Bettina Heintz

# Die Herrschaft der Regel

## Zur Grundlagengeschichte des Computers

Campus Verlag
Frankfurt/New York

K

Die vorliegende Arbeit wurde von der Philosophischen Fakultät I der Universität Zürich im Wintersemester 1991/92 auf Antrag von Prof. Dr. Hansjörg Siegenthaler als Dissertation angenommen.



Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Heintz, Bettina :*
Die Herrschaft der Regel : zur Grundlagengeschichte des Computers / Bettina Heintz. - Frankfurt/Main ; New York : Campus Verlag, 1993
Zugl.: Zürich, Univ., Diss., 1991/92
ISBN 3-593-34860-8


Umschlaggestaltung: Atelier Warminski, Büdingen
Druck und Bindung: Druck Partner Rübelmann GmbH, Hemsbach
Dieses Buch wurde auf säurefreiem Papier gedruckt.
Printed in Germany

# Inhalt

Einleitung 9

Teil 1 Symbolische Maschinen
*Die theoretische Erfindung des Computers* 13

Kapitel 1
Zeichensprache versus Intuition
*Zur Entwicklung und Durchsetzung der formalistischen Auffassung der Mathematik* 16

1. Die Freiheit der Mathematik
Das axiomatische Programm David Hilberts 22

2. Die Wurzeln der Mathematik
Die intuitionistische Mathematik L.E.J. Brouwers 34

3. Die Gewißheit der Mathematik
Das beweistheoretische Programm David Hilberts 44

Kapitel 2
Papiermaschinen
*Das Maschinenmodell Alan M. Turings* 63

1. Mathematik und Maschinerie 69

2. Mathematische Maschinen 79

3. Menschliche Maschinen 89

4. Zusammenfassung: Geist und Mechanismus 99

# Teil 2 Die soziale Welt der Mathematik 107

Kapitel 3
Wissenssoziologie und Mathematik 114

1. Naturwissenschaft im Kontext 114
2. Die soziale Konstruktion der Mathematik 140

Kapitel 4
Das Fließband im Kopf
*Formale Rationalisierung und mathematischer Formalismus* 154

Kapitel 5
Orientierungskrisen
*Zum Zusammenhang von sozialer Krise und Grundlagenkrise in der Mathematik* 175

1. Widersprüche als praktisches Problem 177
2. Krise und Stabilisierung 185

# Teil 3 Reale Maschinen 203

Kapitel 6
Erfindung als Prozeß
*Die technische und kulturelle Konstruktion des Computers* 209

1. Maschinenvarianten
Die technische Erfindung des Computers 211
2. Vom Kalkulator zum Elektronengehirn
Die kulturelle Erfindung des Computers 229

Kapitel 7
Algorithmus und Maschinerie
*Die Bedeutung von Turings Maschinenbegriff für die Techniksoziologie* 234

Kapitel 8
Die Grenzen maschineller Intelligenz 261

1. Maschinelle Intelligenz im Test 261
2. Die sozialen Voraussetzungen künstlicher Intelligenz 278

Danksagung 301

Literaturverzeichnis 303

Personenregister 329

# Einleitung

Der Computer ist ein Produkt der Moderne. Sein innerwissenschaftlicher Entstehungsort ist die Mathematik – jene Mathematik, die man zu Beginn des Jahrhunderts die 'moderne' zu nennen begann –, und sein Design spiegelt die Grundzüge einer Gesellschaft, deren Rationalismus den damaligen Soziologen als hervorstechendstes Merkmal galt. In der 'modernen' Mathematik, so wie sie von David Hilbert zu Beginn dieses Jahrhunderts begründet wurde, ist vorbereitet, was heute als Signum der Nach-Moderne gilt – die Verselbständigung der Zeichen gegenüber ihrem Bezugsgegenstand.

Bis zu Hilbert hatte die Mathematik immer noch einen, wenn auch lockeren Bezug gehabt zu einer Welt außerhalb von ihr. Die Zeichen, mit denen die Mathematiker operierten, standen für etwas, sie hatten eine Bedeutung. Im Hilbertschen Formalismus haben sich die Zeichen aus der Welt zurückgezogen. Sie sind bloß noch Partikel eines in sich geschlossenen semiotischen Systems. Die Moderne geht einher mit dem Verzicht auf Repräsentation. Dies gilt gleichermaßen für die moderne Mathematik wie für die Moderne in Kunst, Musik und Literatur. Die Hilbertsche Mathematik hat den Bruch mit dem Repräsentationsmodell endgültig vollzogen. Die Unterscheidung zwischen Zeichen und Bezeichnetem, die bis anhin unangetastet blieb, löst sich in der mathematischen Moderne auf. Was bleibt, sind die Zeichen, die, wenn überhaupt, bloß auf andere Zeichen verweisen, und Regeln, die bestimmen, wie mit ihnen umzugehen ist.

Die Mathematik der Moderne ist die symbolische Welt, in der der Computer theoretisch gedacht wurde. 1936 hat der englische Mathematiker Alan M. Turing in einer berühmten These die Behauptung aufgestellt, daß jedes Handeln, das einer klaren Vorschrift folgt, auch von einer Maschine ausgeführt, d.h. mechanisiert werden kann. Die Maschine, die Turing in seiner Arbeit beschreibt, ist allerdings eine Maschine nur auf dem Papier. Sie ist ein Gedankenexperiment, ein mathematisches Konstrukt, das Turing einführte, um dem zu dieser Zeit problematisch gewordenen Begriff des Algorithmus eine mathematisch präzise Formulierung zu geben. 1936, als Turing seine Arbeit schrieb, gab es noch keine Computer, und Turing hat auch nicht an richtige Maschinen gedacht, als er seine 'Papiermaschine' konzipierte. Dennoch hat er mit seinem Maschinenmodell das Grunddesign von Digitalcomputern vorweggenommen. Alle Digitalcomputer, die seither entwickelt wurden, sind gleichermaßen gerätetechnische Realisierungen von Turings 'symbolischer' Maschine.

Turings Arbeit, die an sich im engen Kontext der mathematischen Berechenbarkeitstheorie entstanden ist, macht vieles verständlich, womit wir heute ganz praktisch konfrontiert sind. Turings These erklärt uns, weshalb man eine Schachspielerin oder einen Auskunftsbeamten simulieren kann, nicht aber, trotz aller Rhetorik der Künstlichen Intelligenz, ein Alltagsgespräch. Sie erklärt, weshalb ein Computer Dame spielen kann, aber nie imstande sein wird, eine Geschichte zu verstehen. Turing hat mit seiner These die Bedingungen formuliert, die grundsätzlich erfüllt sein müssen, damit geistige Prozesse mechanisierbar sind. Simulation menschlichen Handelns setzt voraus, daß dieses eindeutigen Regeln folgt. Wann immer wir uns wie 'Maschinen' verhalten, sind wir auch durch Maschinen ersetzbar – das ist von einem nicht-mathematischen Standpunkt aus formuliert die Kernaussage von Turings These. Nun ist dies keineswegs generell der Fall, sondern an bestimmte soziale Voraussetzungen geknüpft, die erst entstehen ließen, was Turing als Regelfall annahm. Computer sind nicht überall einsetzbar, sondern nur dort, wo menschliches Handeln klaren Regeln folgt, in Handlungsbereichen mit anderen Worten, die bereits in starkem Ausmaß rationalisiert sind. Der Einsatz des Computers setzt, anders formuliert, jenen historischen Wandlungsprozeß voraus, der, wie ich in dieser Arbeit zu zeigen versuche, ihn selbst überhaupt erst *denkbar* gemacht hat und der zunächst dazu geführt hat, daß sich Menschen in zunehmendem Maße 'mechanisch' zu verhalten hatten.

Dieser Zusammenhang zwischen Rationalisierung, Mathematik und Mechanisierung steht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit. Sie handelt weniger vom Computer selbst als vielmehr von den sozialen und kulturellen Voraussetzungen der Computerisierung, und ihr Ziel ist es, die Grundlagen bereitzustellen für die Entwicklung einer Soziologie des Computers, oder besser: einer Soziologie der Computerisierung. *Teil 1* befaßt sich mit Turings Maschinenmodell und seinen innermathematischen Voraussetzungen. Turings Argumentation bewegt sich im Kontext der 'modernen' Mathematik, so wie sie von David Hilbert begründet worden ist. Was die Besonderheit des mathematischen Formalismus ist, ohne den man weder Turings Arbeit noch die heutigen Computer verstehen kann, und worin seine 'Modernität' besteht, führe ich in Kapitel 1 aus. Mit seiner Arbeit hat Turing die formalistische Auffassung der Mathematik zu Ende gedacht und sie gleichzeitig radikalisiert: Formalisierung und Mechanisierung sind bedeutungsäquivalente Prozesse. Was das genau heißt und welches die Implikationen von Turings These sind, beschreibe ich in Kapitel 2.

Während ich mich in diesem ersten Teil ausschließlich auf die innermathematische Entwicklung beziehe, handelt *Teil 2* von der Beziehung zwischen Mathematik und Gesellschaft. Inwieweit war die Richtung, die die mathematische Diskussion damals nahm, mitbeeinflußt vom sozialen Kontext, in dem sie stattgefunden hat? Gab es Parallelen zwischen dem mathematischen Diskurs und den Entwicklungen in anderen gesellschaftlichen Bereichen? Eine positive Antwort auf diese Frage setzt eine wissenssoziologische Perspektive auf die Mathematik voraus. Daß eine solche Sicht möglich ist und wie sie aussehen könnte, versuche ich in Kapitel 3 zu zeigen.

Die beiden folgenden Kapitel 4 und 5 sind als eine Art 'Fallstudien' zu lesen. Die formalistische Auffassung der Mathematik wurde in einer Zeit entwickelt, in der Deutschland den Durchbruch der Moderne erlebte, nicht nur im Bereich der Kunst, sondern auch im Bereich der Arbeit, der Technik und der sozialen Beziehungen. Läßt sich ein Zusammenhang ausmachen zwischen der Moderne in der Mathematik und der Modernisierung im soziokulturellen Bereich? In Kapitel 4 versuche ich zu zeigen, wie sehr das mathematische Denken von David Hilbert und Alan Turing von außermathematischen Erfahrungen geprägt worden ist – von jenen Erfahrungen, die man in der Soziologie zu dieser Zeit unter dem Begriff der 'Rationalisierung' diskutierte. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der mathematischen Grundlagenkrise zu Beginn dieses Jahrhunderts. Im Gegensatz zur üblichen Interpretation, nach der die Grundlagendebatte in den 20er Jahren ausschließlich innermathematische Gründe hat, stelle ich sie in den Kontext der damaligen Modernisierungskrise, die erst verständlich macht, weshalb die Debatte in dieser Zeit einen so aufgeregten Ton annahm.

Solange die 'Maschine', die Turing beschrieben hatte, nur auf dem Papier existierte, hatten seine Überlegungen kaum praktische Folgen. Dies änderte sich, als in den frühen 40er Jahren der 'wirkliche' Computer erfunden wurde. Von ihm und seinen Folgen, auch für die Soziologie, handelt *Teil 3*. Die Erfindung des Computers geschah über weite Strecken unabhängig von Turings theoretischer Arbeit. Entsprechend dauerte es eine Weile, bis man erkannte, daß der Computer mehr war als eine gigantische Rechenmaschine. Erfindung ist ein mehrstufiger Prozeß, der sich in jeder Phase aufs neue verzweigt. Wie sich dieser Prozeß im Falle des Computers vollzog, beschreibe ich in Kapitel 6.

Die beiden folgenden Kapitel haben mehr systematischen Charakter. Alan Turing hat mit seiner Arbeit ein begriffliches Instrumentarium bereitgestellt, das vielleicht ein neues Licht werfen könnte auf die konventionelle Abgrenzung von Mensch und Maschine. Dies soll in den beiden letzten Kapiteln an zwei Beispielen näher erläutert werden. In Kapitel 7 versuche ich zu zeigen, daß sich auf der Basis von Turings algorithmischem Maschinenbegriff präziser formulieren läßt, was mit 'mechanischem' Verhalten genau gemeint ist. Mit seiner konzeptuellen Entflechtung von Algorithmus und gerätetechnischer Apparatur hat Turing eine theoretische Grundlage bereitgestellt für die Entwicklung eines Maschinenbegriffs, der das Maschinenhafte nicht mehr über dessen materielle Beschaffenheit definiert, sondern über das Verhalten. Aus dieser Perspektive betrachtet beschränkt sich der Gegenstandsbereich der Techniksoziologie nicht auf technische Artefakte, sondern umfaßt alle Prozesse, die sich algorithmisch beschreiben lassen, ungeachtet wie und durch wen sie realisiert sind.

Sehr viel grundsätzlicher noch wird die konventionelle Mensch/Maschine-Unterscheidung durch das Projekt der Künstlichen Intelligenz infrage gestellt. Davon handelt das abschließende Kapitel 8. Ähnlich wie in Kapitel 7 soll auch hier gezeigt werden, daß sich auf der Basis von Turings Überlegungen die Diskussion rund um die Künstliche Intelligenz argumentativ um einiges vereinfachen ließe. Der Erfolg der Künstlichen Intelligenz hat weniger mit der Qualität der Programme zu tun als vielmehr mit dem Verhalten jener, die simuliert werden. Dies ergibt sich als Fazit, wenn man das Projekt der Künstlichen Intelligenz aus der in dieser Arbeit entwickelten Perspektive betrachtet. Turings Argumentation bereitet gewissermaßen das Terrain vor, von dem aus man die *sozialen* Bedingungen in den Blick bekommt, die die Grenzlinie zwischen Mensch und Maschine brüchig werden lassen.

Teil 1

# Symbolische Maschinen

## Die theoretische Erfindung des Computers

# Übersicht

> Mathematics may be defined as the subject in which we never know what we are talking is true.
>
> *Bertrand Russell*[1]

Zur selben Zeit, als Ferdinand Tönnies, Georg Simmel und Max Weber, um nur die bekanntesten Vertreter der klassischen Soziologie in Deutschland zu erwähnen, den modernen Rationalisierungsprozeß zu einem Topos ihrer Gesellschaftstheorie machten, setzte sich in der Mathematik, in der deutschen Mathematik nota bene, die Auffassung durch, daß man das Betreiben von Mathematik reduzieren könne auf einen rein formalen Prozeß, der im wesentlichen darin besteht, Symbolreihen Schritt für Schritt umzuformen, nach klar spezifizierten Regeln und ohne Ansehung ihrer Bedeutung. Alan Turing hat diese formalistische Auffassung der Mathematik zu Ende gedacht und sie gleichzeitig radikalisiert: Jede Operation im Rahmen eines formalen Systems läßt sich im Prinzip auch von einer Maschine ausführen – von einer *symbolischen* Maschine, so wie er sie 1936 in seinem berühmten Aufsatz beschrieben hat, oder von einer *physikalischen* Maschine, wie man zehn Jahre später wußte, als Turings 'Papiermaschine' in Form des Digitalcomputers konkrete Gestalt annahm. Das ist die sog. *Turingthese*, deren Entstehungsvoraussetzungen und deren Implikationen im Mittelpunkt dieser Studie stehen.

Der folgende Teil 1 handelt von den *innermathematischen* Entstehungsvoraussetzungen. In Kapitel 1 werde ich die Entwicklung der formalistischen Auffassung der Mathematik nachzeichnen, so wie sie im ersten Drittel dieses Jahrhunderts entstanden ist, und am Rande auch auf den mathematischen Intuitionismus eingehen, der als Gegenmodell dazu zur selben Zeit von L.E.J. Brouwer entwickelt worden ist. Die formalistische Auffassung der Mathematik war der innermathematische Kontext, innerhalb dessen Turing sein Maschinenmodell entwickelt hat. Auf Turings Überlegungen und ihren Bezug zur formalistischen Mathematik gehe ich in Kapitel 2 ein.

---

1 Russell 1901: 75.

Kapitel 1

# Zeichensprache versus Intuition

## *Zur Entwicklung und Durchsetzung der formalistischen Auffassung der Mathematik*

> So würde die Wissenschaft zum Stillstande gebracht, wenn der Formelmechanismus so überhand nähme, daß er den Gedanken ganz erstickte.
>
> *Gottlob Frege*[1]

Die formalistische Auffassung der Mathematik steht für die mathematische Moderne.[2] Als 'modern' mochte die neue Mathematik den Zeitgenossen aus verschiedenen Gründen erscheinen, modern war aber vor allem der radikale Verzicht auf Repräsentation. Im Formalismus sind die Zeichen 'autark' geworden, sie haben keine Referenzfunktion, keine Bedeutung mehr, und der Mathematiker, der mit ihnen operiert, ist im Prinzip frei in ihrer Setzung. In der formalistischen Mathematik gibt es keinen Verweis mehr auf irgend etwas außerhalb des mathematischen Systems, heiße das nun Anschauung, Evidenz, sinnliche Erfahrung oder Intuition. Die Mathematik erzeugt die Objekte, mit denen sie operiert, und die Regeln, nach denen sie vorgeht, selbst und findet sie nicht irgendwo vor, weder im platonischen Reich der Ideen noch in der empirischen Erfahrung – und genau gegen diese Loslösung der Mathematik von der 'Welt' richtete sich denn auch die Reaktion der Gegenmoderne.

Wenn ich im folgenden von 'Formalismus' spreche, beziehe ich mich auf eine spezifische *Auffassung* der Mathematik, so wie sie in grundlagentheoretischen Arbeiten formuliert wurde, *nicht* auf die alltägliche Praxis der Mathematiker und Mathematikerinnen. Der 'working mathematician' betreibt Mathematik nicht so, wie der Formalismus die Mathematik beschreibt. So spielen z.B. Erfahrungswissen und Intuition im Alltag der Mathematik eine beträchtliche Rolle. Ähnlich wie eine geübte Schachspielerin im Verlaufe der Zeit Konfigurationen auf dem Schachbrett zu 'sehen' vermag (und dieser Blick für Strukturen auch einen großen Teil ihrer Kompetenz ausmacht), entwickelt auch der

1 Frege an Hilbert (1895), in Frege 1976: 59.

2 Dies ist die Interpretation von Herbert Mehrtens 1990, der in seiner dichten und innovativen Studie 'Formalismus' und 'Intuitionismus' als Ausdruck der mathematischen Moderne bzw. Gegenmoderne interpretiert.

Mathematiker ein Gefühl für die Zeichenfolgen auf dem Papier, die für ihn mehr sind als bloße 'Tintenstriche'. Davon soll aber nicht die Rede sein. Es geht im folgenden ausschließlich um die *Theorie* der Mathematik, nicht um ihre Praxis.

Begründer und Promotor der formalistischen Auffassung der Mathematik war David Hilbert (1862 – 1943), der wohl bekannteste Mathematiker seiner Zeit.[3] David Hilbert hat dem Formalismus systematische Form gegeben, und mit seinem eigenen Werk dessen Produktivität hinlänglich bewiesen. Die Wurzeln der formalistischen Auffassung der Mathematik reichen allerdings weiter zurück, bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts, als man begann, die 'Natürlichkeit' der Begriffe, die man bis anhin als selbstverständlich vorausgesetzt hatte – den Begriff der natürlichen Zahl z.B. oder auch den Begriff des Raumes –, zu hinterfragen und sie zum Gegenstand theoretischer Analyse zu machen.[4] Daß man Mathematik nicht mehr bloß einfach betrieb, sondern ihre Gegenstände und ihre Grundlagen einer systematischen Reflexion unterzog, war neu und macht ein wesentliches Merkmal der 'modernen' Mathematik aus.[5] Den Mathematikern, die damals mit der Tradition brachen und an die Stelle des 'natürlich' Gegebenen theoretische Konstrukte setzten, 'künstliche', wie von orthodoxer Seite oft moniert wurde, war der Bruch, den sie vollzogen, noch deutlich bewußt. »Ich weiß sehr wohl«, schrieb etwa

3 Zu David Hilbert und seinen grundlagentheoretischen Arbeiten gibt es eine Reihe von teilweise auch neueren Studien, vgl. u.a. Detlefsen 1986; Kitcher 1976; Mehrtens 1990; Peckhaus 1990; und zu seiner Person vgl. die Biographie von Reid 1989 sowie Blumenthal 1935.

4 Wie Sybille Krämer 1988 in ihrer informativen Studie zeigt, reichen die Wurzeln des Formalismus streng genommen bis ins 16./17. Jahrhundert zurück, als man allmählich begann, die praktischen Verfahren der Mathematik in den Dienst des Begründungswissens, des Beweises, zu stellen. D.h. algorithmische Verfahren wurden nicht mehr bloß unter pragmatischen Gesichtspunkten betrachtet, als Instrumente, konkrete Probleme zu lösen, sondern bekamen den Status einer Beweismethode. Was im Formalismus dann zu einem expliziten Programmpunkt wird – die Gleichsetzung von Wahrheit und mechanischer Herleitbarkeit – hat damals seinen Anfang genommen.

5 Dies wurde von den damaligen Mathematikern auch klar vermerkt. Die ganze Entwicklung der Mathematik sei dahin gegangen, schreibt etwa Paul Bernays 1922 in seinem Aufsatz zum 60. Geburtstag David Hilberts, »alles das, was vordem als einziger Gegenstand der Forschung galt und wovon die Grundeigenschaften als etwas für die Mathematik hinzunehmendes und keiner mathematischen Untersuchung fähiges noch bedürftiges erachtet wurden, dieses seines Ansehens der Ausschließlichkeit und Endgültigkeit zu berauben« (Bernays 1922: 94). Paul Bernays (1888 – 1977) war von 1917 – 1934 Mitarbeiter von Hilbert in Göttingen. Anschließend war er Professor für Mathematik an der ETH Zürich. Er hat mit Hilbert zusammen die beiden Bände *Grundlagen der Mathematik* verfaßt. Einen kurzen Überblick über Bernays' grundlagentheoretische Arbeit gibt Engeler 1978.

Richard Dedekind (1831 – 1916) entschuldigend, »daß gar Mancher in den schattenhaften Gestalten, die ich ihm vorführe, seine Zahlen, die ihn als treue und vertraute Freunde durch das ganze Leben begleitet haben, kaum wiederzuerkennen vermag.« (Dedekind 1888: IVf.)[6]

Wofür Dedekind – er war einer der Begründer der modernen Arithmetik – noch meinte, sich entschuldigen zu müssen, hat David Hilbert zehn Jahre später ohne Umschweife praktiziert: »Wir denken drei verschiedene Systeme von Dingen: die Dinge des ersten Systems nennen wir Punkte und bezeichnen sie mit A, B, C, ...; die Dinge des zweiten Systems nennen wir Gerade und bezeichnen sie mit a, b, c, ...; die Dinge des dritten Systems nennen wir Ebenen und bezeichnen sie mit α, β, γ, ...; (...) Wir denken die Punkte, Geraden, Ebenen in gewissen gegenseitigen Beziehungen und bezeichnen diese Beziehungen durch Worte wie 'liegen', 'zwischen', 'parallel' 'kongruent', 'stetig'; die genaue und vollständige Beschreibung dieser Beziehungen erfolgt durch die Axiome der Geometrie.« (Hilbert 1899: 2) Die Begriffe, die Hilbert einführt, seine 'Punkte' und seine 'Geraden', haben mit den vertrauten Geraden, Punkten und Ebenen nichts mehr zu tun. Sie werden eingeführt über die Axiome und haben wie diese keine inhaltliche Bedeutung mehr. Im Falle einer vollständigen Axiomatisierung der Geometrie könne man ebensogut von »'Tischen', 'Stühlen' und 'Bierseideln'« sprechen, befand Hilbert schon einige Jahre früher.[7] Daß er diese Konsequenz dann doch nicht zog und weiterhin von 'Geraden' und 'Ebenen' und 'Punkten' sprach, war für ihn nur eine »Konzession ans Gewohnte« (Hilbert/Bernays 1934: 7). Hilberts axiomatisch eingeführte 'Geraden' haben mit Geraden noch weniger zu tun als Dedekinds 'schattenhafte Gestalten' mit den natürlichen Zahlen. »Axiomatisch verfahren«, schrieb Hilbert, »heißt in diesem Sinne nichts anderes als mit Bewußtsein denken: während es früher ohne die axiomatische Methode naiv geschah, daß man an gewisse Zusammenhänge wie an Dogmen glaubte, so hebt die Axiomenlehre diese Naivität auf, läßt uns jedoch die Vorteile des Glaubens.« (Hilbert 1922: 16)

Ähnlich wie die Grundbegriffe gerieten zu dieser Zeit auch die Grundlagen der Mathematik in den Sog kritischer Reflexion. Wie kann

---

6 Und er fährt fort: »Er wird durch die lange, der Beschaffenheit unseres Treppen-Verstandes entsprechende Reihe von einfachen Schlüssen, durch die nüchterne Zergliederung der Gedankenreihen, auf denen die Gesetze der Zahlen beruhen, abgeschreckt und ungeduldig darüber werden, Beweise für Wahrheiten verfolgen zu sollen, die ihm nach seiner vermeintlichen inneren Anschauung von vornherein einleuchtend und gewiß erscheinen.« (Dedekind 1888: V)

7 So überliefert von Hilberts erstem Biograph Otto Blumenthal 1935: 403.

man wissen, ob die Voraussetzungen, von denen man ausgeht, stimmig sind? Woher bezieht die Mathematik die Gewißheit, daß ihre Folgerungen widerspruchsfrei sind? Die Frage nach der Sicherheit mathematischer Schlüsse war nicht grundsätzlich neu. Vor ähnliche Begründungsprobleme sah man sich bereits im späten 17. und im 18. Jahrhundert gestellt im Zusammenhang mit der Einführung der Infinitesimalrechnung, d.h. unendlich kleiner Größen (u.a. Thiel 1972: 72ff.). Neu aber war die Grundsätzlichkeit der Problemstellung und die Systematik, mit der man – und hier wäre an erster Stelle Gottlob Frege (1848 – 1925) zu nennen – die Frage nach den Grundlagen der Mathematik anging. Freges Zielsetzung weist über einen lokalen Begründungsversuch hinaus. Es geht ihm nicht um die Begründung einer Teildisziplin, sondern um eine systematische Reflexion des 'Ur-Grunds' der Mathematik. »Das Ideal einer streng wissenschaftlichen Methode der Mathematik (...) möchte ich so schildern. Daß Alles bewiesen werde, kann zwar nicht verlangt werden, weil es unmöglich ist; aber man kann fordern, daß alle Sätze, die man braucht, ohne sie zu beweisen, ausdrücklich als solche ausgesprochen werden, damit man deutlich erkenne, worauf der ganze Bau beruht. Es muß danach gestrebt werden, die Anzahl dieser Urgesetze möglichst zu verringern, indem man alles beweist, was beweisbar ist.«[8]

Was für die einzelnen mathematischen Grundbegriffe galt, gilt auch für ihre Grundannahmen: Was bislang als selbstverständlich hingenommen wurde, soll explizit gemacht werden. Das ist der Kern von Freges Programm, und insofern gilt Frege heute als Begründer der modernen Grundlagenforschung. Aber worauf beruht der 'Bau', und was sind die 'Ur-Gesetze'? Für Frege war die Logik das Fundament. Die ihm heute zugeschriebene *logizistische* Begründung der Mathematik besteht im wesentlichen darin, die Arithmetik auf die (formale) Logik zurückzufüh-

---

8 Zit.in Krämer 1988: 131f. Wolfgang Stegmüller hat den Begründungsanspruch von Frege folgendermaßen formuliert: »Frege war es bereits vor der Entdeckung der Antinomien aufgefallen, daß man sich in der elementarsten mathematischen Disziplin, nämlich der Arithmetik der natürlichen Zahlen, angewöhnt hatte, einen naiven Standpunkt gegenüber dem Unendlichkeitsproblem zu akzeptieren: Man nimmt dort die Reihe der natürlichen Zahlen als etwas Letztgegebenes an. Demgegenüber werden die arithmetischen Operationen Addition, Multiplikation usw. von den Mathematikern durch Definitionen eingeführt; ebenso erfolgen auch die Erweiterungen des Zahlbegriffs über die Einführung der negativen, gebrochenen, irrationalen und komplexen Zahlen durch eigene Konstruktionsvorschriften. Die Reihe der natürlichen Zahlen wird dagegen als etwas bereits Vorhandenes angesehen. Dies erschien Frege deshalb als außerordentlich problematisch, weil damit die Existenz einer unendlichen Gesamtheit als gegeben angenommen wird.« (Stegmüller 1989: 436)

ren und sie dadurch zu begründen. Wie diese Begründung im einzelnen aussieht, spielt für meinen Zusammenhang keine Rolle. Für meine Fragestellung entscheidend ist nicht die Form des Fregeschen Begründungsprogramms, sondern sein Postulat, die Grundlagen, auf denen die Mathematik beruht, in ein explizites System zu überführen, ähnlich wie dies Richard Dedekind und radikaler noch Giuseppe Peano (1858 – 1932) für die Zahlen, Bernhard Riemann (1826 – 1866) für den Raum und Karl Weierstraß (1815 – 1897) für den Funktionsbegriff gefordert (und eingelöst) hatten.[9]

Hans Niels Jahnke spricht in diesem Zusammenhang von einem Trend zur *Theoretisierung* der Mathematik im 19. Jahrhundert (Jahnke 1990). Mit dieser 'Theoretisierung' war ein neues begriffliches Denken verbunden, das durch drei Merkmale charakterisiert ist: Die Begriffe, die gebildet werden, sind nicht mehr bloß auf die Klassifikation des Bestehenden gerichtet, sondern haben explorativen, 'schöpferischen' Charakter. Zweitens wird die naive Vorstellung von Anschauung (im Sinne eines unmittelbares Schauens) als erkenntnisleitendes Prinzip problematisiert. Aus diesem Grund ist in Hinblick auf die Mathematik des 19. Jahrhunderts oft von einer 'Krise der Anschauung' die Rede (z.B. Volkert 1986 im Titel). Und schließlich sind die Begriffsdefinitionen weniger auf die Dinge selbst als vielmehr auf ihre Interrelationen gerichtet, genauso wie es Hilbert in seinen *Grundlagen der Geometrie* etwas später exemplarisch vorführt: »Wir denken die Punkte, Geraden, Ebenen in gewissen gegenseitigen Beziehungen und bezeichnen diese Beziehungen durch Worte wie 'liegen', 'zwischen', 'parallel', 'kongruent', 'stetig'; die genaue und vollständige Beschreibung dieser Beziehungen erfolgt durch die Axiome der Geometrie.« (Hilbert 1899: 2)

Im Zuge dieser begrifflichen Reflexion und Rekonstruktion verlieren wesentliche Teile der Mathematik den Charakter des Natürlichen und Anschaulichen. Im Endeffekt beziehen sich die Begriffe auf nichts mehr außerhalb des mathematischen Systems. Die 'Dinge' in Hilberts axiomatischer Geometrie können 'Stühle' oder 'Punkte', 'Bierseidel' oder 'Ebenen' genannt werden. Das ist beliebig, denn sie haben weder mit Stühlen noch mit Punkten etwas zu tun. Die anti-intuitive Wende, die von den Mathematikern in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts vorbereitet worden war und die Hilbert dann zum Programm erklärte, bezieht sich,

9 Zur Vorgeschichte der modernen Mathematik im 19. Jahrhundert vgl. u.a. Volkert 1986; Mehrtens 1990, insb. Kap. 1; Bourbaki 1977; Kline 1980, insb. Kap. VIII; Purkert/Ilgauds 1987; Stein 1988; Thiel 1972, insb. S. 72ff.

wie Herbert Mehrtens schreibt, auf alle Gebiete der Mathematik: »Die Mathematik, die über sich selbst als Sprache spricht, erkennt, teilweise, daß und wie sie Wissen produziert. Unter diesem Erkennen scheitert die naive Annahme, daß die produzierte Ordnung nur Reproduktion, Repräsentation einer gegebenen Ordnung sei. Funktion, Dimension, Raum, Maß, Zahl – alles entpuppt sich als Begriff, der gemacht ist, und der, will man an ihm arbeiten, immer noch einmal gemacht werden muß.« (Mehrtens 1990: 91f.)[10]

Mit seiner formalistischen Konzeption der Mathematik griff Hilbert Gedanken auf, die die Mathematiker der 'Vormoderne' entwickelt und formuliert hatten, mitunter mit einiger Ambivalenz, und bündelte sie zu einer integralen und in sich stimmigen Vision 'moderner' Mathematik. Was heute als Kernstück von Hilberts Auffassung der Mathematik gilt – die axiomatische Methode, seine Beweistheorie und sein finiter Standpunkt –, wurde von ihm allerdings nicht in einem Zug entwickelt, sondern entstand allmählich, nicht zuletzt in Auseinandersetzung mit seinem schärfsten Gegner, dem holländischen Mathematiker L.E.J. Brouwer (1881 – 1966).[11] Der Hilbertsche Formalismus (und das intuitionistische Gegenprogramm Brouwers) wird normalerweise in Beziehung gesetzt zu den Antinomien, die man um die Jahrhundertwende in der von Georg Cantor begründeten Mengenlehre entdeckt hatte. Wie Herbert Mehrtens überzeugend darlegt, ging es bei der Debatte um die Grundlagen der Mathematik jedoch um mehr als um die richtige Strategie zur Vermeidung von Widersprüchen. Im Kern handelte es sich um zwei grundlegend verschiedene Auffassungen davon, was Mathematik ist und worin sie gründet, was ihr Wahrheitskriterium ist und worüber sich ihr Gegenstandsbereich konstituiert (Mehrtens 1984; 1990).

Hilberts Auffassung der Mathematik hat sich in zwei Phasen entwickelt. Ich stelle sie in zwei gesonderten Abschnitten vor. Die erste Phase datiert um die Jahrhundertwende. In dieser Phase entwickelt Hilbert seine *axiomatische Methode* und führt ihre Produktivität am Beispiel der Geometrie vor (vgl. Abschnitt 1). Die zweite Phase setzt nach dem 1. Weltkrieg ein und reicht bis in die 30er Jahre. In dieser zweiten Phase entwickelt Hilbert seine sog. *Beweistheorie*, mit der er die Widerspruchs-

---

10 Diese kritische und radikale Befragung des Fundaments, dem man bislang naiv vertraut hatte, ist ein gutes Beispiel für jenen säkularen Trend, den Jürgen Habermas als 'Rationalisierung der Lebenswelt' bezeichnet hat (vgl. Habermas 1981).

11 Auf die nicht nur innermathematischen Gründe für die Verschärfung der Grundlagenproblematik in den frühen 20er Jahren gehe ich in Kapitel 5 näher ein.

freiheit der Mathematik ein für allemal sicherstellen will (vgl. Abschnitt 3). Überlegungen dazu hat Hilbert zwar bereits 1904 formuliert, systematisch ausgearbeitet hat er sie jedoch erst in den frühen 20er Jahren – nicht zuletzt als Reaktion auf die damalige Verschärfung der Grundlagenproblematik und als Antwort auf den wachsenden Erfolg der intuitionistischen Mathematik Brouwers. Auf dessen Auffassung der Mathematik gehe ich in einem mittleren Abschnitt ein.[12]

## 1. Die Freiheit der Mathematik
### *Das axiomatische Programm David Hilberts*

> Denn für ihn hatte die Mathematik die Bedeutung einer Weltanschauung, und er ging an jene grundsätzlichen Probleme mit der Gesinnung eines Eroberers, der bestrebt ist, dem mathematischen Denken einen möglichst umfassenden Machtbereich zu erkämpfen.
>
> *Paul Bernays*[13]

Kernstück des Hilbertschen Formalismus ist die *axiomatische Methode*, die er 1899 am Beispiel der Geometrie erfolgreich vorgeführt hatte und ein Jahr später auch auf die Arithmetik anzuwenden suchte (Hilbert 1900b). »Axiomatisch verfahren heißt mit Bewußtsein denken«, hatte Hilbert geschrieben, und das hieß: sich bewußt zu sein, daß die Annahmen, von denen man ausgeht, vielleicht doch nicht die letztfundierenden sind. Hilberts formale Axiomatik habe »revolutionär« gewirkt, schrieb sein damaliger Schüler Otto Blumenthal rückblickend dreißig Jahre später. Ihren »gewaltigen Erfolg« hätten die *Grundlagen der Geometrie* in

12 Hermann Weyl unterscheidet im Werk Hilberts fünf Perioden, die gleichzeitig fünf Themenkreisen entsprechen. Eine davon ist grundlagentheoretischen Fragen gewidmet und wird von Weyl in zwei Phasen unterteilt, die den von mir erwähnten in etwa entsprechen: »i. Theory of invariants (1885 – 1893). ii. Theory of algebraic number fields (1893 – 1898). iii. Foundations, (a) of geometry (1898 – 1902), (b) of mathematics in general (1922 – 1930). iv. Integral equations (1902 – 1912). v. Physics (1910 – 1922).« (Weyl 1944: 245f.) Was die grundlagentheoretischen Arbeiten betrifft (Pkt. iii.), so sind die beiden Phasen in Weyls Überblick allzu stark auseinandergerissen. Ähnlich hat man auch in der Geschichte der Grundlagendebatte meistens die zweite Phase, das 'Hilbertprogramm' im engen Sinn, in den Mittelpunkt gerückt und es nur am Rande in Zusammenhang gebracht mit seinen grundlagentheoretischen Arbeiten zu Beginn des Jahrhunderts. In seinem 1904 gehaltenen Vortrag *Über die Grundlagen der Logik und der Arithmetik* hat Hilbert jedoch bereits einige Überlegungen vorweggenommen, die er dann zwanzig Jahre später im Rahmen seiner Beweistheorie weiter ausgebaut hat; vgl. zu dieser Frage der Phaseneinteilung auch Peckhaus 1990.

13 Bernays 1922: 94.

erster Linie »der radikalen Abstraktion von der Anschauung und ihrem Ersatz durch logische Verknüpfungen« verdankt. Von heute aus gesehen – Blumenthal schrieb diesen Aufsatz zu einem Zeitpunkt, als der Formalismus bereits seit einiger Zeit Mehrheitsmeinung war – könne man sich kaum mehr vorstellen, »welche Neuheit diese Auffassung damals bedeutete« (Blumenthal 1935: 403).[14]

Axiomatisierung schafft Ordnung und Transparenz. In seinem 1917 in Zürich gehaltenen Vortrag *Axiomatisches Denken* verglich Hilbert eine axiomatisierte Theorie mit einem »Fachwerk von Begriffen«, dem »einige wenige ausgezeichnete Sätze des Wissensgebietes« zugrunde liegen: die Axiome. Von denen ausgehend lasse sich nach »logischen Prinzipien das ganze Fachwerk« systematisch aufbauen. »Die fortschreitende Entwicklung des einzelnen Wissensgebietes beruht dann lediglich in dem weiteren logischen Ausbau des schon aufgeführten Fachwerkes der Begriffe.« (Hilbert 1918: 2) In der *inhaltlichen* Axiomatik, das klassische Beispiel dafür ist die Euklidsche Geometrie, hatte man eine kleine Anzahl von unbewiesenen Ausgangssätzen an den Anfang gestellt und daraus die weiteren Sätze, die Theoreme, durch logisches Schlußfolgern abgeleitet. Rechtfertigung fand die Wahl der Axiome durch den Hinweis auf ihre Evidenz bzw. Anschaulichkeit. Die Wahrheit der Euklidschen Geometrie war durch die Evidenz ihrer Axiome verbürgt, und diese brauchten nicht weiter begründet zu werden, da, wie es Gottlob Frege 1899 in einem Brief an Hilbert formulierte, »ihre Erkenntnis aus einer von der logischen ganz verschiedenen Erkenntnisquelle fließt, die man Raumanschauung nennen kann« (Frege 1976: 63). Mit der Entdeckung der Nicht-Euklidschen Geometrien wurde das naive Rekurrieren auf die Anschauung allerdings zunehmend problematisch. Es waren nun offensichtlich Geometrien denkbar, die sich nur schlecht mit der menschlichen Raumerfahrung vertrugen. Damit geriet die erkenntnisbegründende Funktion der Anschauung immer mehr in eine Krise – Hilberts *formale* Axiomatik ist eine Antwort darauf.

Funktion und Verfahrensweise der formalen axiomatischen Methode, so wie er sie erstmals in seinen *Grundlagen der Geometrie* vorgeführt hatte, resümierte Hilbert ein Jahr später in seiner Abhandlung *Über den Zahlbegriff*. In der Geometrie »pflegt man mit der Annahme der Existenz der sämtlichen Elemente zu beginnen, d.h. man setzt von vornherein drei

14 Zum historischen und ideengeschichtlichen Hintergrund der *Grundlagen der Geometrie* vgl. Freudenthal 1957 sowie Toepell 1986.

Systeme von Dingen, nämlich die Punkte, die Geraden und die Ebenen, und bringt sodann diese Elemente (...) durch gewisse Axiome, nämlich die Axiome der Verknüpfung, der Anordnung, der Kongruenz und der Stetigkeit, miteinander in Beziehung. Es entsteht dann die notwendige Aufgabe, die Widerspruchslosigkeit und Vollständigkeit dieser Axiome zu zeigen, d.h. es muß bewiesen werden, daß die Anwendung der aufgestellten Axiome nie zu Widersprüchen führen kann, und ferner, daß das System der Axiome zum Nachweis aller geometrischen Sätze ausreicht (=Vollständigkeit, B.H.). Wir wollen das hier eingeschlagene Untersuchungsverfahren die axiomatische Methode nennen.« (Hilbert 1900b: 257)

In der formalen Axiomatik werden die Axiome nicht mehr inhaltlich gedeutet. Sie sind gewissermaßen *Satzungen* – »freie Schöpfungen des menschlichen Geistes«, wie es Albert Einstein 1921 formulierte (zit. in Hans Freudenthal 1957: 114). Ob die Axiome 'wahr' sind oder 'falsch', ist im Prinzip bedeutungslos. Axiome sind Annahmen hypothetischer Art, deren inhaltliche Wahrheit nicht zur Debatte steht. Es geht um Transparenz und um Widerspruchsfreiheit, nicht um Wahrheit in einem traditionellen Sinne. Für die »logische Abhängigkeit der Lehrsätze von den Axiomen«, sei es gleichgültig, so Hilberts Gefolgsmann Paul Bernays, »ob die vorangestellten Axiome wahre Sätze sind oder nicht; sie (die logische Abhängigkeit B.H.) stellt einen rein hypothetischen Zusammenhang dar: wenn es sich so verhält, wie die Axiome aussagen, dann gelten die Lehrsätze.« (Bernays 1930: 19f.)[15]

Unter der Leitung Hilberts expandiert die Mathematik zu einer Königsdisziplin. Sie entwirft ohne Bezugnahme auf irgendwelche »Tatsächlichkeiten« (Hilbert/Bernays) hypothetische, kontingente Welten – in sich geschlossene formale Universen, die sich entweder selbst genügen, das ist die 'reine' Mathematik, oder zum Instrument werden für die empirischen

---

15 Und weiter: »Eine solche Loslösung der Deduktion von der Behauptung der Wahrheit der Ausgangssätze ist keineswegs eine müßige Spitzfindigkeit. Vielmehr kann eine axiomatische Entwicklung von Theorien, die ohne Rücksicht auf die Wahrheit der zum Ausgang genommenen Grundsätze erfolgt, für unsere wissenschaftliche Erkenntnis von hohem Wert sein, indem auf diese Weise einerseits Annahmen, deren Zutreffen zweifelhaft ist, durch die systematische Verfolgung ihrer logischen Konsequenzen einer Prüfung an Hand der Tatsachen zugänglich gemacht werden und ferner die Möglichkeiten der Theorienbildung a priori, nach Gesichtspunkten der systematischen Einfachheit, gleichsam auf Vorrat durch die Mathematik erforscht werden können. Mit der Entwicklung solcher Theorien übernimmt die Mathematik die Rolle derjenigen Disziplin, welche man früher als mathematische Naturphilosophie bezeichnete.« (Bernays 1930: 20)

Wissenschaften, insbesondere natürlich für die Physik. Weshalb es trotz der prinzipiellen Willkürlichkeit der axiomatischen Satzung doch immer wieder zu einer Übereinstimmung kommt zwischen dem mathematischen Modell und der physikalischen Welt, weshalb mit anderen Worten die Mathematik nicht nur rein, sondern allem Anschein nach auch brauchbar ist, dafür fiel auch Hilbert keine strenge Erklärung ein. Er verwies statt dessen einigermaßen kryptisch auf »jene scheinbar prästabilisierte Harmonie, welche der Mathematiker so oft in den Fragestellungen, Methoden und Begriffen verschiedener Wissensgebiete wahrnimmt«, auf die innerwissenschaftlich offensichtlich nicht zu erklärende wundersame Konvergenz von Denken und Sein – und genau auf dieser Ebene wird die formale Mathematik in einem traditionellen Sinne wieder 'wahr' (Hilbert 1900a: 293).[16]

Die Grundbegriffe des axiomatischen Systems, im Falle der Geometrie: die 'Geraden', 'Punkte' und 'Ebenen', die Begriffe 'zwischen', 'kongruent' oder 'liegen', sind ausschließlich immanent definiert, über die Axiome, und haben ebenso wie diese keine inhaltliche Bedeutung mehr. »Wir denken ein System von Dingen; wir nennen diese Dinge Zahlen und bezeichnen sie mit a, b, c,...«, schreibt Hilbert in seiner Abhandlung über den Zahlbegriff in durchaus gewollter Parallele zu seiner Einführung der 'Dinge' in den *Grundlagen der Geometrie*. »Wir denken diese Zahlen in gewissen gegenseitigen Beziehungen, deren genaue und vollständige Beschreibung durch die (...) Axiome geschieht.« (Hilbert 1900b: 257f.) Was diese Dinge 'sind', die Geraden, Punkte und Ebenen im einen Fall, die Zahlen im anderen, darüber wird keine Aussage gemacht. »Punkte und Gerade«, erläutert Richard Baldus 1920 in seiner Antrittsvorlesung zur Beziehung zwischen Mathematik und Raumanschauung, »sind Dinge, weiter nichts (...) Daß der Punkt keine Ausdehnung hat, die Gerade nur Länge, die Ebene nur Länge und Breite, wird mit keinem Wort erwähnt. Man kann sich also zunächst unter dem Wort Punkt irgend etwas vorstellen, z.B., wenn man bei einer geometrischen Figur bleiben will, einen Kreis, denn das ist ja auch ein Ding, und unter dem Worte Gerade irgendein anderes Ding.« (Baldus 1921: 13)

16 Ähnlich argumentiert Hilbert auch dreißig Jahre später in seinem 1930 in Königsberg gehaltenen Vortrag *Naturerkennen und Logik*, mit dem er seine öffentliche Karriere abschloß. Daß Natur und Denken finit sind, das Unendliche mit anderen Worten nirgends realisiert ist, war ihm ebenso Zeichen der erstaunlichen »Übereinstimmung von Natur und Denken« wie die Brauchbarkeit der 'reinen' Mathematik für die praktischen Bedürfnisse der Physik (Hilbert 1930a).

Obschon die Begriffe, die Hilbert wählt: 'Punkte', 'Geraden', 'kongruent', 'parallel' oder 'liegen', an den konventionellen Sprachgebrauch anschließen, erhalten sie ihre Bestimmung erst innerhalb und durch das axiomatische System. Die in den Axiomen erwähnten Begriffe werden nicht von vornherein als gegeben angenommen, sondern durch die Axiome überhaupt erst eingeführt – *implizit definiert*, wie der Terminus heißt. »Wenn es sich darum handelt, die Grundlagen einer Wissenschaft zu untersuchen, so hat man ein System von Axiomen aufzustellen, welche eine genaue und vollständige Beschreibung derjenigen Beziehungen enthalten, die zwischen den elementaren Begriffen jener Wissenschaft stattfinden. Die aufgestellten Axiome sind zugleich die Definitionen jener elementaren Begriffe, und jede Aussage innerhalb des Bereiches der Wissenschaft, deren Grundlagen wir prüfen, gilt uns nur dann als richtig, falls sie sich mittels einer endlichen Anzahl logischer Schlüsse aus den aufgestellten Axiomen ableiten läßt.« (Hilbert 1900a: 299f.)

Solange sie mit den Axiomen verträglich sind, kann man sich deshalb unter den 'Geraden' auch »Bierseidel« vorstellen – oder Schornsteinfeger: »Es ist doch selbstverständlich eine jede Theorie nur ein Fachwerk oder Schema von Begriffen nebst ihren nothwendigen Beziehungen zu einander«, schreibt Hilbert 1899 an Gottlob Frege. »Die Grundelemente können in beliebiger Weise gedacht werden. Wenn ich unter meinen Punkten irgendwelche Systeme von Dingen, z.B. das System: Liebe, Gesetz, Schornsteinfeger..., denke und dann nur meine sämmtlichen Axiome als Beziehungen zwischen diesen Dingen annehme, so gelten meine Sätze, z.B. der Pythagoras auch von diesen Dingen. Mit anderen Worten: eine jede Theorie kann stets auf unendlich viele Systeme von Grundelementen angewandt werden.« (Hilbert an Frege, in Frege 1976: 67)[17]

Wenn aber die Axiome keinen Bezug mehr haben zur Erfahrung (und dadurch ihren Wahrheitswert bekommen), sondern im Prinzip beliebig setzbar sind, so stellt sich die Frage, woran sich nun ihre Wahrheit und

17 Was Hilbert hier einigermaßen salopp formuliert, die Tatsache nämlich, daß es für ein formales Axiomensystem verschiedene Interpretationen, d.h. Modelle geben kann, hat Paul Bernays in seinem Geburtstagsaufsatz in eine etwas gediegenere Form gebracht: »Das Axiomensystem als Ganzes bildet nicht den Anspruch einer Wahrheit, vielmehr ist die logische Struktur der axiomatischen Geometrie (...) eine rein hypothetische: Wenn irgendwo in Wirklichkeit drei Systeme von Gegenständen vorliegen sowie bestimmte Beziehungen zwischen diesen Gegenständen, derart, daß für diese die Axiome der Geometrie zutreffen, d.h. daß bei geeigneter Zuordnung der Namen zu den Gegenständen und Beziehungen die Axiome in wahre Behauptungen übergehen (= Interpretation, B.H.), dann treffen für diese Gegenstände und Beziehungen auch alle Lehrsätze der Geometrie zu.« (Bernays 1922: 96)

die Wahrheit der aus ihnen abgeleiteten Sätze festmachen läßt. Hilbert führt dafür das Kriterium der *Widerspruchsfreiheit* ein – und stieß damit bei den orthodoxen Mathematikern auf teilweise heftige Kritik. Die Widerspruchsfreiheit der Theorie ergebe sich aus der Wahrheit der Axiome und nicht umgekehrt, moniert Gottlob Frege, der, nachdem er Hilberts *Grundlagen der Geometrie* gelesen hatte, über diesen Punkt mit Hilbert in einen Briefwechsel tritt. »Axiome nenne ich Sätze, die wahr sind, die aber nicht bewiesen werden, weil ihre Erkenntnis aus einer von der logischen ganz verschiedenen Erkenntnisquelle fließt, die man Raumanschauung nennen kann. Aus der Wahrheit der Axiome folgt, daß sie einander nicht widersprechen.« (Frege an Hilbert, in Frege 1976: 63) Hilbert zeigt sich erstaunt: »Es hat mich sehr interessirt, gerade diesen Satz bei Ihnen zu lesen, da ich nämlich, solange ich über solche Dinge denke, schreibe und vortrage, immer gerade umgekehrt sage: Wenn sich die willkürlich gesetzten Axiome nicht einander widersprechen mit sämtlichen Folgen, so sind sie wahr, so existieren die durch die Axiome definirten Dinge. Das ist für mich das Criterium der Wahrheit und Existenz.« (Hilbert an Frege, in Frege 1976: 66)

Wahrheit und Existenz, dies macht den Kernpunkt der Hilbertschen Auffassung der Mathematik aus, haben keinen äußeren Bezugspunkt mehr, sondern sind ausschließlich *immanent* definiert. Die Dinge, mit denen sich die Mathematik beschäftigt, sind nicht einfach 'da', sondern werden von ihr selbst erzeugt. Existent ist das, was den Axiomen des Mathematikers nicht widerspricht: »Wenn man einem Begriffe Merkmale erteilt, die einander widersprechen, so sage ich: der Begriff existiert mathematisch nicht. So existiert z.B. mathematisch nicht eine reelle Zahl, deren Quadrat gleich −1 ist. Gelingt es jedoch zu beweisen, daß die dem Begriffe erteilten Merkmale bei Anwendung einer endlichen Anzahl von logischen Schlüssen niemals zu einem Widerspruche führen können, so sage ich, daß damit die mathematische Existenz des Begriffes (...) bewiesen worden ist.« (Hilbert 1900a: 300f.) Auf ähnliche Weise wird auch der Begriff der 'Wahrheit' von allen ontologischen Bezügen befreit. Wahrheit wird nicht mehr definiert über ein wie auch immer indirektes Korrespondenzverhältnis mit einer äußeren Wirklichkeit, seien das nun Erfahrungstatsachen oder das platonische Reich der Ideen, sondern wird gleichgesetzt mit Widerspruchsfreiheit im Rahmen eines vom Mathematiker selber geschaffenen Universums. Die Mathematik erzeugt sich damit gewissermaßen selbst. Sie wird referenzlos und gleichzeitig selbstreferentiell.[18]

Genau das kann Frege, der in diesem Disput die Tradition vertritt, nicht akzeptieren. Um die Absurdität der Hilbertschen Argumentation augenfällig zu machen, führt er ein in seiner Sicht überzeugendes Beispiel an: »Am schroffsten stehen sich wohl unsere Ansichten gegenüber hinsichtlich Ihres Kriteriums der Existenz und der Wahrheit. Aber vielleicht verstehe ich Ihre Meinung nicht vollkommen. Um darüber ins Reine zu kommen, lege ich folgendes Beispiel vor. Nehmen wir an, wir wüßten, daß die Sätze

'1. A ist ein intelligentes Wesen;
2. A ist allgegenwärtig;
3. A ist allmächtig'

mit ihren sämtlichen Folgen einander nicht widersprächen; können wir daraus schließen, daß es ein allmächtiges, allgegenwärtiges, intelligentes Wesen gäbe? Mir will das nicht einleuchten.« (Frege an Hilbert, in Frege 1976: 74f.) Hilbert vermutlich auch nicht, wenn auch aus anderen Gründen. Auf Freges Brief hat er allerdings nie geantwortet.

Hilbert hätte Frege sicher darin zugestimmt, daß man aus der Widerspruchsfreiheit von Sätzen über Gott nicht auf dessen faktische Existenz schließen kann, nur hätte ihn diese Schlußfolgerung wohl kaum interessiert. Es ging Hilbert gerade nicht um ontologische Aussagen, und in diesem Sinn war Freges Frage in seinen Augen vermutlich falsch gestellt. Existenz ist bei Hilbert ein *systemrelativer* Begriff, ein Konstrukt, ohne jegliche ontische Qualität. Die moderne Mathematik zeichnet sich, so Paul Bernays, dadurch aus, »daß Existenz im mathematischen Sinne nichts anderes bedeutet als Widerspruchsfreiheit. Hiermit ist gemeint, daß für die Mathematik keine philosophische Existenzfrage bestehe« (Bernays 1950: 92). Anstatt sich über die Ontologie der mathematischen Gegenstandswelt Gedanken zu machen, lag Hilberts Ziel gerade darin, die Mathematik von allen ontologischen Voarannahmen zu befreien. Sie frei zu machen für eine autonome, nur der mathematischen Gemeinschaft anheim gestellten Setzung der ihr eigenen Wirklichkeit: »Wenn sich die willkürlich gesetzten Axiome nicht einander widersprechen (...), so existieren die durch die Axiome definirten Dinge. Das ist für mich das Cri-

18 Indem die moderne Mathematik ihre Objekte nicht von irgendwoher übernimmt, sondern sie selbst erzeugt, wird sie – in Luhmanns Terminologie – zu einem 'autopoietischen' System, ganz ähnlich wie dies Rudolf Stichweh für die Naturwissenschaften seit dem 19. Jahrhundert gezeigt hat. Ich komme in Kapitel 3 darauf zurück.

terium der Wahrheit und Existenz.« Die moderne Mathematik erzeugt ihre Gegenstände selbst und findet sie nicht irgendwo vor, auch nicht im platonischen Reich der Ideen. Und diese 'Gegenstände' sind Worte und Symbole. »Sie haben«, so Herbert Mehrtens, »Existenz und können Bestandteil wahrer Sätze sein, wenn sie Bestandteil einer logisch konsistenten Sprache sind (...) Eine mathematische Theorie ist eine Symbolsprache, die sich auf nichts außer sich selbst, das heißt nur auf die eigenen Regeln bezieht.« (Mehrtens 1990: 123)

Hilberts *Grundlagen der Geometrie* sind das 'exemplar'[19] der mathematischen Moderne, und sie sind zum Symbol avanciert für die neu entdeckte 'Freiheit' des Mathematikers: »(Il est) un livre qui, par la lucidité et la profondeur de l'exposé, devait aussitôt devenir, à juste titre, la charte de l'axiomatique moderne (...) Il met ainsi clairement en relief, dans un domaine considéré jusque-là comme un des plus proches de la réalité sensible, la liberté dont dispose le mathématicien dans le choix de ses postulats. Malgré le désarroi causé chez plus d'un philosophe par ces 'métagéométries' aux propriétés étranges, la thèse des *Grundlagen* fut rapidement adoptée de façon à peu près unanime par les mathématiciens. H. Poincaré, pourtant peu suspect de partialité en faveur du formalisme, reconnaît en 1902 que les axiomes de la géométrie sont des conventions, pour laquelle la notion de 'vérité', telle qu'on l'entend d'habitude, n'a plus de sens. La 'vérité mathématique' réside ainsi uniquement dans la déduction logique à partir des prémisses posées arbitrairement par les axiomes.« (Bourbaki 1977: E IV. 49)

Wenn sich aber das Verhältnis von Wahrheit und Widerspruchsfreiheit in diesem Sinn verschiebt, dann ist Widerspruchsfreiheit nicht mehr garantiert (über die 'Wahrheit' der Axiome), sondern muß nachgewiesen werden. Wie ein solcher Nachweis aussehen könnte, hat Hilbert in seinen *Grundlagen der Geometrie* vorexerziert. Er hat sich dabei der Methode der Rückführung bedient, und deren Kern besteht im wesentlichen darin, den geometrischen Axiomen ein Modell zuzuordnen, in diesem Fall ein arithmetisches Modell, So daß jede Formel und jeder Term eine arithmetische Entsprechung hat. Mit der Methode der Arithmetisierung werden, in der Formulierung von Hilbert und Bernays, die »Gegenstände der Theorie durch Zahlen oder Zahlensysteme und die Grundbeziehungen durch Gleichungen und Ungleichungen (repräsentiert) derart, daß auf Grund dieser Übersetzung die Axiome der Theorie in arithmetische Iden-

19 Exemplar' hier im Kuhnschen Sinne des 'Musterbeispiels' (vgl. Kuhn 1977).

titäten bzw. beweisbare Sätze übergehen« (Hilbert/Bernays 1934: 3). Ein Widerspruch im Axiomensystem der Geometrie müßte sich folglich als Widerspruch im arithmetischen Modell zu erkennen geben.

Dieser Widerspruchsfreiheitsbeweis ist allerdings nur ein *relativer*: Die Rückführung der Geometrie auf die Arithmetik setzt voraus, daß diese selbst widerspruchsfrei ist. D.h. das Grundproblem ist damit nicht gelöst, sondern es hat sich, genau genommen, bloß verschoben – auf den Nachweis der Widerspruchsfreiheit der Arithmetik, und ein solcher Beweis müßte, da eine weitere Rückführungsebene fehlt, ein absoluter sein.[20] Wie ein solcher Nachweis zu bewerkstelligen ist, dies hat Hilbert im Rahmen seiner Beweistheorie formuliert, die er in Ansätzen zwar bereits 1904 entwickelt hatte, aber erst in den Jahren nach dem 1. Weltkrieg systematisch ausgebaut hat.

Daß im Falle der Arithmetik die Rückführungsmethode versagt, war das eine Problem. Das andere war bedeutsamer und hatte zu tun mit einer folgenreichen Bedeutungsverschiebung im Begriff des 'Unendlichen'. Mit dem Unendlichen hatte man in der Mathematik schon immer operiert, aber es wurde verstanden als sog. *Potentiell*-Unendliches, d.h. als etwas Werdendes, Mögliches, nicht aber als eine abgeschlossene Gesamtheit, nicht als *Aktual*-Unendliches. Denn aus der Annahme, daß man im Prinzip immer weiter zählen kann, ergibt sich nicht zwangsläufig, daß das Unendliche auch 'aktual', d.h. als eine fixe Größe existiert.[21] Sobald aber die »ins Unendliche offene, gesetzmäßig entstehende Reihe der Zahlen zu einem geschlossenen Inbegriff an sich existierender Gegenstände« gemacht wird, steht man, wie es Hermann Weyl 1926 formulierte, »bereits am anderen Ufer: das Zahlsystem ist ein Reich absoluter Existenzen geworden« (Weyl 1926: 31). Diesen »Sprung ins Jenseits« (Weyl) hat Georg Cantor (1845 – 1918) mit seiner transfiniten Arithmetik vollzogen.[22]

---

20 Außer man betrachtet, wie Gottlob Frege es tat, die Logik als weitere Rückführungsebene.

21 Die Vorstellung, daß sich Aktual- und Potentiell-Unendliches nicht ineinander überführen lassen, geht auf Aristoteles zurück, der die Idee des Potentiell-Unendlichen folgendermaßen umschreibt: »Überhaupt existiert das Unendliche nur in dem Sinne, daß immer ein Anderes und wieder ein Anderes genommen wird, das eben Genommene aber immer ein Endliches, jedoch immer ein Verschiedenes und wieder Verschiedenes ist.« (Zit. in Lorenzen 1968a: 96) Zum Begriff des Aktual-Unendlichen vgl. auch Bernays 1930: 33ff.

22 Zu Georg Cantor und seiner Konzeption des Aktual-Unendlichen vgl. Purkert/Ilgauds 1987; Purkert 1990; Moore 1990.

Cantors Theorie der transfiniten Zahlen erschien Hilbert als die »bewundernswerteste Blüte mathematischen Geistes«, und dessen transfinite Arithmetik galt ihm als »Paradies«, aus dem niemand die Mathematiker soll vertreiben können (Hilbert 1925: 85; 88). Das Cantorsche Paradies zu retten und gleichzeitig die Widerspruchsfreiheit der Mathematik zu beweisen, war denn auch das erklärte Ziel der Hilbertschen Beweistheorie. Die mit dem Begriff des 'Aktual-Unendlichen' verbundenen Annahmen waren allerdings sehr viel problematischer als es Hilberts Metapher suggeriert. Cantor hatte mit seinem berühmten Diagonalverfahren (das auch Turing später verwenden sollte), bewiesen, daß die reellen Zahlen – im Unterschied zu den übrigen Zahlen – nicht abzählbar sind, und schloß daraus, daß die Menge der reellen Zahlen, das sog. Kontinuum, größer – oder wie er sagte: 'mächtiger' – sei als jene der rationalen (und ganzen und natürlichen) Zahlen. Es gibt also, um Hilberts Formulierung zu übernehmen, nicht nur »ein einziges Unendlich«, sondern mindestens zwei davon (Hilbert 1925: 86).

Zur Erinnerung: Das problemlose Grundfundament der Zahlen bilden die *natürlichen* Zahlen. Als 'natürliche' Zahlen bezeichnet man die positiven ganzen Zahlen 1, 2, 3, ... Die *ganzen* Zahlen sind zusätzlich noch aus den negativen ganzen Zahlen und der Zahl Null gebildet: ..., −3, −2, −1, 0, +1, +2, +3, ... . Die *rationalen* Zahlen sind Zahlen, die das Verhältnis zweier ganzer Zahlen ausdrücken, d.h. sie entsprechen den Brüchen. Da auch Brüche wie z.B. 6/3 oder −8/4 zu den rationalen Zahlen gezählt werden, sind die ganzen Zahlen (und dies gilt natürlich auch für die natürlichen) ein Teil der rationalen. Als *reelle* Zahlen schließlich bezeichnet man Zahlen, die sich als endliche oder unendliche Dezimalfolgen darstellen lassen. Die rationalen Zahlen sind folglich eine Teilmenge der reellen Zahlen. *Abzählbar* unendlich ist eine Menge von Zahlen, wenn sie sich eineindeutig der Menge der natürlichen Zahlen zuordnen läßt. Ihre Elemente sind dann gewissermaßen numerierbar. So ist z.B. die Menge der rationalen Zahlen äquivalent – oder um den Term von Cantor zu benutzen – von gleicher 'Mächtigkeit' wie die Menge der natürlichen Zahlen: Jedem Bruch läßt sich eineindeutig, d.h. in einer 1:1-Relation eine natürliche Zahl zuordnen – obschon die Menge der natürlichen Zahlen eine Teilmenge der Menge rationalen Zahlen ist. Eine unendliche Menge kann also, und das ist eine der vielen Paradoxien des Unendlichen, gleichmächtig zu einer ihrer Teilmengen sein.[23]

---

23 Die Frage, ob es zwischen den Mächtigkeiten der natürlichen und der reellen Zahlen Zwischenstufen gibt, bezeichnet das berühmte Kontinuumsproblem. Mit seiner Kontinuumshypothese stellte Cantor die Vermutung auf, daß es keine solchen Zwischenstufen gibt, daß, anders formuliert, das Kontinuum die nächstfolgende Mächtigkeit nach der Mächtigkeit der natürlichen Zahlen bildet. Es gelang ihm aber nicht, seine Vermutung zu beweisen. Hilbert stellte in seinem Vortrag *Mathematische Probleme* die Kontinuumshypothese an die erste Stelle seiner 23 Probleme, ohne sie jedoch selber beweisen zu können (vgl. Hilbert 1900a). Erst in den 60er Jahren wurde nachgewiesen, daß das Kontinuumsproblem prinzipiell nicht lösbar ist.

In einem zweiten Schritt bewies Cantor, daß man zu jeder unendlichen Menge M eine mächtigere Menge bilden kann, nämlich die sog. Potenzmenge P, die aus den Teilmengen der Ausgangsmenge M besteht.[24] Das Unendliche, das ist die Implikation dieses Beweises, ist folglich vorstellbar als eine unendliche Hierarchie von Mächtigkeiten. Ausgehend von der Mächtigkeit der Menge N der natürlichen Zahlen läßt sich eine Folge von Mengen mit aufsteigenden Mächtigkeiten konstruieren. Zunächst deren Potenzmenge P (N), die gleichmächtig ist wie das Kontinuum, dann die Potenzmenge P (P N) usw. - ohne Ende. Denn auch wenn alle diese Mengen gebildet sind, gibt es, wie Cantor bewies, immer noch eine Menge, die mächtiger ist als die mächtigste unter ihnen. Vom Rechnen mit diesen unendlichen Mengen handelt Cantors transfinite Arithmetik.[25]

Cantor ging bei seiner Überlegungen von einer mengentheoretischen Interpretation der Zahlen aus. D.h. er begriff auch die Mengen der nichtabzählbaren Zahlen, die Menge der reellen Zahlen z.B. und ihre Potenzmengen, als abgeschlossene Gesamtheiten, die sich ihrerseits wieder zählen lassen. Dabei benützte er eine Mengendefinition, die sich bald einmal als äußerst folgenreich erweisen sollte: »Unter einer 'Menge' verstehen wir«, so Cantors gleichermaßen berühmte wie problematische Definition der Menge, »jede Zusammenfassung M von bestimmten wohlunterschiedenen Objekten m unserer Anschauung oder unseres Denkens (welche die 'Elemente' von M genannt werden) zu einem Ganzen.« (Zit. in Purkert/Ilgauds 1987: 158) Problematisch war dieser Mengenbegriff insofern, als er erlaubte, von einer Menge aller Mengen zu sprechen, und

---

24 Eine Potenzmenge P ist die Menge aller Teilmengen einer Menge M. Die endliche Menge M = {1,2,3} z.B. besteht aus folgenden Teilmengen M = {1,2,3}, {1,2}, {1,3,}, {2,3}, {1}, {2,}, {3}, Ø ('wobei 'Ø' die leere Menge symbolisiert). Diese 8 Teilmengen sind die Elemente der Potenzmenge P. Da jede Menge aus n Elementen $2^n$ Teilmengen hat, ist es im Falle endlicher Mengen unmittelbar einsichtig, daß die Potenzmenge mächtiger ist als die Ausgangsmenge. Cantor bewies nun, daß dies auch für die unendlichen Mengen gilt.

25 Cantor hat zur Charakterisierung seiner unendlichen Mengen zwei neue Zahlklassen eingeführt: *Kardinalzahlen* sind Zahlen, mit denen die Mächtigkeit von Mengen charakterisiert wird. Mengen gleicher Mächtigkeit erhalten die gleiche Kardinalzahl zugewiesen. Mit den *Ordinalzahlen* wird eine Ordnungsdimension eingeführt. Ordinalzahlen sind Zahlen, die eine *geordnete* Folge von Elementen mengentheoretisch charakterisieren. Cantor realisierte die Klasse der Ordinalzahlen durch eine Konstruktion von Mengen, die unter sich selbst wieder angeordnet und sogar wohlgeordnet sind, d.h. jede Ordinalzahl $\omega$ - selbst eine Menge - besitzt einen Nachfolger $\omega'$ und jede nicht-leere Menge von Ordinalzahlen besitzt ein kleinstes Element. Die endlichen Ordinalzahlen realisierte Cantor durch die leere Menge 0: = Ø und die einelementigen Mengen 1: = {0}, 2: = {1} etc. Die kleinste unendliche Ordinalzahl ist $\omega_0$: = {0,1,2,3,...} und ihr Nachfolger ist $\omega_0'$: = {0,1,2,3,...,$\omega_0$}.

auf diese Menge aller Mengen bezog sich Cantors Definition ebenfalls. Damit wird jedoch bei der Definition auf eine Gesamtheit Bezug genommen, der die zu definierende Menge selbst angehört. Eine solche sog. imprädikative Definition führt zu einem logischen Zirkel, und genau darauf macht die berühmte Antinomie von Bertrand Russell aufmerksam.

Die *Russellsche Antinomie* geht von einer Menge M aller Mengen aus, die sich nicht selbst als Element enthalten. Wie läßt sich diese Menge M charakterisieren? Enthält sie sich selbst als Element oder nicht? Wenn M sich nicht selbst als Element enthält, dann ist sie eine Menge, die gemäß der Definition als Element in M aufzunehmen ist. Ein Widerspruch. Auf der anderen Seite: Wenn M sich als Element enthält, ist sie wie alle Elemente von M eine Menge, die sich nicht selbst als Element enthält. Ein anderer Widerspruch.[26]

Mit dieser Antinomie, die Russell 1901 entdeckte und 1902 Giuseppe Peano und anschließend Gottlob Frege mitteilte, war erwiesen, daß die Mengenlehre, die dem Cantorschen 'Paradies' zugrunde lag, zu Widersprüchen führt.[27] Diese Entdeckung sei, wie Hilbert rückblickend schreibt, »für die mathematische Welt geradezu von katastrophaler Wirkung« gewesen (Hilbert 1925: 87).[28] Die »Zeit des höchsten Triumphes« schien für das Unendliche vorbei zu sein, zumal die von Russell entdeckte Antinomie auch in Freges System auftrat. Die Mathematiker hätten auf diese Entdeckung mehrheitlich defätistisch reagiert, berichtet Hilbert zwanzig Jahre später. In seinen Augen allerdings ohne Grund. Denn es gibt, so Hilbert zuversichtlich, »einen völlig befriedigenden Weg, den Paradoxien zu entgehen, ohne Verrat an unserer Wissenschaft

---

26 Zum Üben: Man teile die Adjektive der deutschen Sprache in solche ein, die eine Eigenschaft beschreiben, die auf sie selbst zutrifft, und in solche, die das nicht tun. Die Adjektive der ersten Gruppe – z.B. 'deutsch', 'mehrsilbig', 'beginnt mit 'a'' etc. – werden 'autologisch' genannt, die der zweiten Gruppe – etwa 'rätoromanisch', 'einsilbig', 'attraktiv' usw. – heißen 'heterologisch'. Zu welcher Gruppe gehört das Adjektiv 'heterologisch'? Ist 'heterologisch' tatsächlich heterologisch? Diese der Russellschen Antinomie nachgebildete Antinomie stammt von Kurt Grelling (vgl. Bachmann 1983: 154).

27 Viele Mathematiker, und dazu gehörten insbesondere die Intuitionisten, verorteten die wahre Ursache der Widersprüche im allzu sorglosen Umgang mit dem Unendlichen. »Als ihre Wurzel«, schrieb etwa Hermann Weyl, »vermag man aber nur die schon von Anfang an in der Mathematik begangene Kühnheit aufzudecken: daß ein Feld konstruktiver Möglichkeiten als geschlossener Inbegriff an sich seiender Gegenstände behandelt wurde.« (Weyl 1926: 41)

28 Daß weder die Entdeckung der Antinomien noch ihre Rezeption so gradlinig verlief, wie es hier den Anschein machen könnte, werde ich in Kapitel 5 zeigen.

zu üben«. Dieser Weg habe ihn zu seiner Beweistheorie geführt (Hilbert 1925: 88).

So gradlinig, wie es Hilbert im Rückblick darstellt, vollzog sich seine Lösungssuche allerdings nicht. Mehr als zehn Jahre lang publizierte er nichts zu diesem Thema, sondern behandelte Grundlagenfragen nur im Rahmen von Vorlesungen. Erst gegen Ende des 1. Weltkrieges begann er sich dieser Thematik wieder vermehrt zuzuwenden. Den Anfang machte sein 1917 gehaltener Vortrag *Axiomatisches Denken*, endgültige Form erhielt seine Beweistheorie – oder 'Metamathematik', wie er sie auch nannte – aber erst in den frühen 20er Jahren. In der Zwischenzeit hatte sich Hilberts Gegenspieler L.E.J. Brouwer mit seinen Arbeiten zur Topologie ein erhebliches wissenschaftliches Ansehen geschaffen – und damit eine Basis, um von ihr aus noch einmal nachdrücklich sein intuitionistisches (Gegen-)Programm zu propagieren. Bevor ich näher auf die Grundgedanken von Hilberts Beweistheorie und auf seine Konzeption formalistischer Mathematik eingehe, möchte ich in knappen Zügen die Position Brouwers vorstellen.

## 2. Die Wurzeln der Mathematik
### *Die intuitionistische Mathematik L.E.J. Brouwers*

> Brouwer würde es ablehnen, der Behauptung zuzustimmen, daß es entweder regnet oder daß es nicht regnet, ohne selbst aus dem Fenster gesehen zu haben.
> *Frank P. Ramsey*[29]

> Brouwer – das ist die Revolution!
> *Hermann Weyl*[30]

Hilberts Gegenspieler, vor allem in den 20er Jahren, war der holländische Mathematiker L.E.J. Brouwer (1881 – 1966). Mit seinem *intuitionistischen* Programm hatte Brouwer eine Auffassung der Mathematik formuliert, die jener von Hilbert diametral entgegengesetzt war. Die Meinungen über ihn und seine Mathematik liefen weit auseinander, auch bei den Schülern und Kollegen Hilberts. Während Hermann Weyl Brouwers Mathematik die »höchste intuitive Klarheit« zusprach und sie sogar – »in the excitement of the first postwar years«, wie er später entschuldigend

---

29 Ramsey 1926: 180.
30 Weyl 1921: 158.

schrieb – als »Revolution« feierte[31], sahen die reinen Formalisten in Brouwers Programm einen Frontalangriff auf die Errungenschaften der modernen Mathematik. Der Intuitionismus lasse, so befand etwa Abraham Fraenkel 1924, vom »stolzen Bau« der modernen Mathematik nur eine »trübselige Ruine« übrig (Fraenkel 1924: 88), und Hilbert selbst qualifizierte Brouwers Programm als »Verbotsdiktatur«, die die Mathematik »zerstückeln und verstümmeln« würde (Hilbert 1922: 14).[32]

Brouwers Programm, das er erstmals in seiner 1907 veröffentlichten Dissertation formuliert hatte und dann, mit einigen Modifikationen und Unterbrüchen, im Laufe der Jahre weiter ausarbeitete, war tatsächlich radikal, im wörtlichen und im übertragenen Sinne. Die Mathematik soll neu begründet werden, und zwar nicht, indem dem klassischen Bestand einfach ein neues, nun widerspruchsfreies Fundament zugrunde gelegt wird, sondern auf der Basis einer grundlegenden Analyse der Natur des mathematischen Denkens. Ausgangspunkt dieser Analyse ist die Urerfahrung der zeitlichen Ereignisabfolge – »the simple intuition of time, in which repetition is possible in the form: 'thing in time and again thing', as a consequence of which moments of life break up into sequences of things which differ qualitatively. These sequences thereupon concentrate in the intellect into mathematical sequences, not sensed but observed.« (Brouwer 1907: 53)[33]

Was im 'Leben' als durch die Zeit geschiedene Verschiedenheit, im elementaren Fall als Zweiheit, erfahren – oder besser: konstruiert wird, denn Brouwer versteht diese Grundwahrnehmung als Ergebnis eines »Willenaktes« (Brouwer 1928b: 417f.) –, verdichtet sich im mathematischen Denken zur Ur-Intuition des 'eins-zwei', des 'eins-nach-dem-Anderen'. Die mathematische Abstraktion »beraubt«, wie Brouwer schreibt, das »intellektuelle Urphänomen der Auseinanderfallung eines Lebensmomentes in zwei qualitativ verschiedene Dinge (...) ihres dinglichen Inhal-

---

31 Die Zitate stammen der Reihe nach aus Weyl 1926: 44; Weyl 1944: 268; Weyl 1921: 158.

32 Zu L.E.J. Brouwers Leben und Werk vgl. vor allem die umfassende Monographie von Walter P. van Stigt 1990 sowie Mehrtens 1990: 257ff. und van Dalen 1978. Eine relativ frühe und gut lesbare Darstellung des Brouwerschen Intuitionismus stammt von seinem Schüler Arend Heyting (Heyting 1934, insb. Kap. 1).

33 Das Zitat stammt aus Brouwers Dissertation *On the Foundations of Mathematics*, die er 1907 veröffentlichte (Brouwer 1907). Die ursprüngliche Fassung hatte einen etwas anderen Charakter als die publizierte Version. Sie enthielt Passagen vor allem philosophischer Art, die von Brouwers Doktorvater D.J. Korteweg jedoch nicht akzeptiert wurden und die deshalb in der publizierten Fassung nicht enthalten sind; vgl. dazu Stigt 1980; Stigt 1990: 40ff.

tes« und behält sie nur »als leere Form, als gemeinsames Substrat aller Zweiheiten übrig« (Brouwer 1928b: 417; 418). Diese mathematische Grundintuition, »the intuition of two-oneness«, erzeugt, so Brouwer, »not only the numbers one and two, but also the finite ordinal numbers, inasmuch as one of the elements of the two-oneness may be thought of as a new two-oneness, which process may be repeated indefinitely; this gives rise still further to the smallest infinite ordinal number ω. Finally this basal intuition of mathematics, in which the connected and the separate, the continuous and the discrete are united, gives rise immediately to the intuition of the linear continuum, i.e., of the 'between', which (und dies ist gegen die Vorstellung des Aktual-Unendlichen gerichtet, B.H.) is not exhaustible by the interposition of new units and which therefore can never be thought of as a mere collection of units.« (Brouwer 1912: 127f.)[34]

Was sich nicht aus dieser Grundintuition herleiten läßt, muß aus dem Fundus der Mathematik ausgeschlossen werden. Dazu gehört insbesondere, und darum drehte sich dann auch der Streit, die Vorstellung eines Aktual-Unendlichen und die Anwendung des Prinzips des *tertium non datur* auf unendliche Gesamtheiten.[35] Und umgekehrt: Nur jene Gegenstände sind als mathematisch existent anzusehen, die in einer endlichen Konstruktion aus den natürlichen Zahlen aufgebaut werden können – eine Forderung, die der Hilbertschen Konzeption mathematischer Existenz diametral entgegengesetzt ist. In intuitionistischer Sicht sind die mathematischen Gegenstände nicht präexistent und brauchen bloß noch entdeckt zu werden, wie es der Platonimus unterstellt, und ebensowenig ist formale Widerspruchsfreiheit ein Kriterium für mathematische Existenz, wie es Hilbert postulierte. Existenz wird bei Brouwer inhaltlich definiert

34 Die Behauptung, daß sich die reellen Zahlen konstruktiv herleiten lassen, hat Brouwer später zurückgenommen.

35 Das Prinzip des *tertium non datur* gehört zum Grundrüstzeug der klassischen Mathematik und liegt insbesondere auch einer gängigen mathematischen Beweisstrategie, der *reductio ad absurdum*, zugrunde. Der Satz vom ausgeschlossenen Dritten behauptet, daß, wenn sich die Negation eines Satzes als falsch erweist, der Satz selbst wahr sein muß. Damit wird aber nur die Negation eines Satzes konstruktiv erzeugt, nicht aber dessen Affirmation. Auf sie wird bloß über den Satz des ausgeschlossenen Dritten geschlossen – und dies widerspricht dem intuitionistischen Prinzip, daß jeder mathematische Gegenstand konstruktiv hergeleitet werden muß, bevor seine Existenz als gegeben angenommen werden kann. Aus der intuitionistischen Begründung der Mathematik folge klar, so Hermann Weyl, »daß das Prinzip des *tertium non datur* sich auf keine Evidenz berufen kann, wenn es auf Aussagen angewendet wird, in denen 'es gibt' und 'alle' sich nicht auf eine Menge einzeln aufgewiesener Objekte beziehen, sondern auf unendliche Mengen« (Weyl 1971: 32).

und ihr Ursprung ist die Grundintuition der 'Zweiheit', von wo aus die mathematischen Gegenstände durch ein »Denkhandeln« sukzessiv aufgebaut werden. Existenz und Gewißheit werden letztlich im menschlichen Geist verankert –»in the acting mind of man« (van Stigt 1990: x), d.h. außerhalb der Mathematik, oder besser: *vor* ihr.

Dies ist nicht der einzige Punkt, in dem sich Brouwers und Hilberts Auffassung der Mathematik grundlegend unterscheiden. Ein anderer war ihre Konzeption des Stellenwerts und der Funktion von Sprache. Brouwer hat strikt unterschieden zwischen mathematischem Denken auf der einen und dessen sprachlicher Kodifizierung auf der anderen Seite. Mathematik ist für Brouwer, wie es sein Schüler Arend Heyting formuliert, »ein Erzeugnis des menschlichen Geistes. Die Sprache, sowohl die gewöhnliche wie die formalistische, gebraucht er nur zu Mitteilung (...) Eine solche sprachliche Begleitung ist kein Bild der Mathematik, noch weniger die Mathematik selbst.« (Zit. in Heitsch 1976: 115f.) Das mathematische Denken vollzieht sich ohne Sprache. Es liegt *vor* der sprachlichen Formulierung – und erst recht vor der Symbolsprache des Formalismus. Expliziter noch als Hilbert es tat, hat Brouwer hervorgehoben, daß im Formalismus die Mathematik zu einer *Sprache* wird, zu einer Zeichen-Sprache, bei der die traditionelle Beziehung zwischen den Zeichen und ihren Referenten aufgebrochen ist: »The question where mathematical exactness does exist, is answered differently by the two sides; the intuitionist says: in the human intellect, the formalist says: on paper.« (Brouwer 1912: 125)

In seiner 1912 gehaltenen Antrittsvorlesung legt Brouwer, sehr pointiert, die Differenzen frei, die zwischen dem Intuitionismus – »largely French« – und dem Formalismus – »largely German« – bestehen, und gibt dabei eine Darstellung des Formalismus (wie er ihn übrigens als erster bezeichnet hat), die sich mit dieser Präzision bei Hilbert damals noch nicht findet. Für den Formalisten, schreibt er, bestehe »mathematical exactness merely in the method of developing the series of relations, and is independent of the significance one might want to give to the relations or the entities which they relate. And for the consistent formalist these meaningless series of relations to which mathematics are reduced have mathematical existence only when they have been represented in spoken or written language together with the mathematical-logical laws upon which their development depends, thus forming what is called symbolic logic.« (Brouwer 1912: 125) Die formalistische Mathematik beschränkt sich in seinen Augen darauf, bedeutungsfreie Symbole und

Symbolketten zu transformieren, ohne Angabe von Sinn und Bedeutung. Sie ist frei in der Setzung von Axiomen, Zeichen und Regeln, sie ist ohne Grund und ohne Anfang – ganz im Gegensatz zu seiner eigenen Mathematik, an deren Ausgangspunkt die Frage steht, »wie die Mathematik im Leben wurzelt«.[36]

Mit seiner Begründung der Mathematik im ursprünglichen Akt des Ordnens der Welt hat Brouwer eine Sicht formuliert, die von ihrem Grundgedanken her eine gewisse Ähnlichkeit mit Edmund Husserls Versuch aufweist, die Wissenschaften, eingeschlossen die Mathematik, zurückzuführen auf die Konstitutionsleistungen des Subjekts, sie in der 'Lebenswelt' zu begründen.[37] Ähnlich wie Husserl in seinem *Krisis*-Werk, nur sehr viel weniger differenziert begründet, betrachtet auch Brouwer die 'objektive' Welt als Ergebnis der Konstitutionsleistungen des Subjekts. Was Husserl jedoch relativ nüchtern analysiert, schildert Brouwer in dramatischen Metaphern der Entfremdung. Um Brouwers Wissenschafts- und Zivilisationsschelte etwas mehr Kontur zu verleihen, soll die Objektivismus-Kritik Husserls kurz skizziert werden.

Die Bifurkation zwischen Welt und Subjekt, die die neuzeitliche Wissenschaft auszeichnet, und die mit ihr einhergehende Entwertung der subjektiven Erkenntnisleistung, lag für Edmund Husserl am Ursprung der von ihm konstatierten »Krisis der Wissenschaften«. Die neuzeitliche Wissenschaft zeichnet sich seit Galilei (und an ihm exemplifiziert Husserl auch seine Kritik) durch eine zunehmende Ausklammerung der subjektiven Anteile am Erkenntnisprozeß aus.[38] Die Natur selbst, nicht die menschliche Anschauung von ihr, soll die Richtschnur sein für ihre wissenschaftliche Erhellung. Beides scheint seit der Neuzeit immer weniger zu korrespondieren. Die Beziehung zwischen Gegenstand und Anschauung, zwischen der Welt an sich und ihrer phänomenalen Erscheinung, erweist sich als zunehmend problematisch. Die Sprache der Natur ist, wie Galilei schreibt, in der Sprache der Mathematik geschrieben. Die

---

36 Brouwer 1906 in einem Brief an seinen Doktorvater D.J. Korteweg, zit. in Mehrtens 1990: 258.

37 Edmund Husserl (1859 – 1938), von Hause aus Mathematiker, lehrte von 1901 – 1916 wie Hilbert in Göttingen und beschäftigte sich dort vor allem mit Fragen der Logik. Seine im folgenden kurz referierte Kritik am Objektivismus der Wissenschaft, auf die ich in Kapitel 3 noch einmal zurückkommen werde, hat er allerdings erst sehr viel später, in den 30er Jahren, in seinem berühmten Text *Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendentale Phänomenologie* formuliert (vgl. Husserl 1936).

38 Vgl. dazu ausführlich die informative Studie von Kutschmann 1986.

Eigenschaften ihrer Objekte sind rein metrischer und kinematischer Natur. Alle anderen Attributionen – Farben, Gerüche, Töne etc. – sind menschliche Sinneserscheinungen, 'Einbildungen', wie der Terminus in der neuzeitlichen Wahrnehmungstheorie hieß.[39] Den Sinnen ist ganz offensichtlich nicht zu trauen. »The nature gets credit which should in truth be reserved for ourselves«, schreibt Alfred N. Whitehead mit schöner Ironie, »the rose for its scent, the nightingale for his song, and the sun for his radiance. The poets are entirely mistaken. They should address their lyrics to themselves, and should turn them into odes of self-congratulation on the excellency of the human mind. Nature is a dull affair, soundless, scentless, colourless; merely the hurrying of material, endlessly, meaninglessly.« (Whitehead 1925: 80)[40]

Wie aber läßt sich die Natur erkennen, wenn sie uns, wie die Metapher lautete, »durch einen Schleier der Ideen« verborgen ist? Darauf gab es zwei Antworten: Die erste bestand in der Entwicklung einer neuen Disziplin, der Wahrnehmungs- und Erkenntnispsychologie. Sie hatte zu klären, wie der Mensch zu seinen 'Imaginationen' gelangt und was von ihnen zu halten ist. Die zweite, und in diesem Zusammenhang wichtigere, war der Versuch, den subjektivem Anteil am Erkenntnisprozeß weitmöglichst auszuschalten. Der Mensch muß von sich selbst abstrahieren, um die Natur, 'so wie sie wirklich ist', wahrzunehmen – »soundless, scentless, colourless; merely the hurrying of material, endlessly, meaninglessly«.

In diesem Projekt verbirgt sich ein Problem und gleichzeitig ein Paradox. Unterschieden wird zwischen der Natur, 'so wie sie wirklich ist', und der Natur, so wie sie wahrgenommen wird. Mit der 'objektiven' Natur beschäftigt sich die Physik, mit der Anschauung von ihr die neu entstehende Erkenntnistheorie. Die Natur, 'so wie sie wirklich ist', wird auf metrische und kinematische Größen reduziert, die Natur, so wie sie der Anschauung erscheint, ist reich an Farben, Gerüchen und Geräu-

39 Diese Unterscheidung zwischen den 'primären Qualitäten', d.h. den Eigenschaften, die tatsächlich 'ihren Sitz in der Materie' haben, und den 'sekundären Qualitäten', den menschlichen Sinneswahrnehmungen, war lange Zeit der Angelpunkt der neuzeitlichen Wahrnehmungstheorien. Man bräuchte nur, schrieb Galilei in seinem *Saggiatore*, »die Ohren, die Zunge und die Nase zu entfernen«, dann würde man merken, daß »die Formen, die Anzahl und die Bewegungen bleiben, nicht aber die Gerüche, die Geschmacksempfindungen und die Töne«. Sie seien ebenso wie das Kitzeln und Prickeln nur »Namen«, ohne jeglichen realen Gehalt, zit. in Kutschmann 1986: 222.

40 Zu Whiteheads Philosophie vgl. die instruktive Studie von Alois Rust 1987.

schen. Damit entstehen zwei Realitätsbereiche – ein physikalischer und ein sinnlich-anschaulicher –, die nicht mehr miteinander in Verbindung zu bringen sind. Whitehead bezeichnet diese Aufspaltung als »bifurcation of nature«. Und es ist genau diese 'Bifurkation', die Kluft zwischen 'objektivistischer Wissenschaft' und 'Lebenswelt', die für Husserl die 'Krisis' seiner Zeit ausmacht.

Im Objektivismus wird der Welt als objektive Eigenschaft zugerechnet, was an sich Produkt menschlicher Wahrnehmung und Erkenntnisleistung ist. Whitehead spricht in diesem Zusammenhang von 'misplaced concreteness': das Modell wird für die Sache selbst gehalten. Ganz ähnlich argumentieren auch Husserl (und Brouwer): »In der geometrischen und naturwissenschaftlichen Mathematisierung messen wir so der Lebenswelt (...) ein wohlpassendes Ideenkleid an, das der sogenannten objektivwissenschaftlichen Wahrheiten (...) Das Ideenkleid 'Mathematik und mathematische Naturwissenschaft', oder dafür das Kleid der Symbole, der symbolisch mathematischen Theorien, befaßt alles, was (...) als die 'objektiv wirkliche und wahre' Natur die Lebenswelt vertritt, sie verkleidet. Das Ideenkleid macht es, daß wir für wahres Sein nehmen, was eine Methode ist.« (Husserl 1936: 55) Was zur Entwertung der menschlichen Erkenntnisfähigkeit führt, ist also letztlich deren Produkt und müßte folglich ebenso infragegestellt gestellt werden wie die Imagination von Farben, Geräuschen und Gerüchen.[41]

Der wissenschaftliche 'Objektivismus', den Husserl vor allem auch im logischen Positivismus seiner Zeit verkörpert sah, ist für ihn eine notwendige Folge dieser in der Neuzeit einsetzenden Problematisierung (und Entwertung) der subjektiven Anteile am Erkenntnisprozeß. Als 'objektivistisch' bezeichnete er jene Wissenschaften, die von der Existenz einer bewußtseinsunabhängigen Wirklichkeit ausgehen und in ihr, das ist der entscheidende Punkt, eine unabhängige Instanz für die Beurteilung wissenschaftlicher Aussagen sehen. Positivistische Wissenschaft unterscheidet sich in dieser Hinsicht nicht von dem, was Husserl als die »Generalthesis der natürlichen Einstellung« bezeichnet. Die Wirklichkeit, so wie

41 Whitehead bringt dieses Paradox genau auf den Punkt: »What I am essentially protesting against is the bifurcation of nature into two systems of reality, which in so far as they are real, are real in different senses. One reality would be the entities such as electrons which are the study of speculative physics. This would be the reality which is there for knowledge; although on this theory it is never known. For what is known is the other sort of reality, which is the byplay of the mind. Thus there would be two natures, one is the conjecture and the other is the dream.« (Whitehead 1920: 30)

sie sich der Erfahrung präsentiert, wird unreflektiert als gegeben vorausgesetzt (vgl. Kap. 3).

Demgegenüber geht die transzendentale Phänomenologie von der subjektiven Konstituiertheit aller Erfahrungsdaten aus. Was der alltäglichen Erfahrung (oder der objektivistischen Wissenschaft) als bewußtseinsunabhängige Welt erscheint, ist in Tat und Wahrheit das Ergebnis der erkennenden und bedeutungszuweisenden Leistungen des Subjekts. Es sind die intentionalen Akte und Erlebnisse, aus denen sich die Sinnbezüge der Welt aufbauen. Was als Welt erscheint, ist ein (vergegenständlichtes) Korrelat dieser Bewußtseinsleistungen. Deshalb lassen sich die Daten, die in den empirischen Wissenschaften erhoben werden, nicht als unabhängiges Attribut der Wirklichkeit zurechnen. Sie sind ebenso subjektiv konstituiert wie meine alltägliche Wahrnehmung des Tisches vor mir. »Der Seinssinn der vorgegebenen Lebenswelt ist subjektives Gebilde, ist Leistung des erfahrenden, des vorwissenschaftlichen Lebens. In ihm baut sich der Sinn und die Seinsgeltung der Welt auf, und jeweils der Welt, welchem dem jeweilig Erfahrenden wirklich gilt. Was die 'objektiv wahre' Welt anlangt, die Welt der Wissenschaft, so ist sie Gebilde höherer Stufe aufgrund des vorwissenschaftlichen Erfahrens und Denkens bzw. seiner Geltungsleistungen. Nur ein radikales Zurückfragen auf die Subjektivität, und zwar auf die letztlich alle Weltgeltung mit ihrem Inhalt und in allen vorwissenschaftlichen und wissenschaftlichen Weisen zustandebringende Subjektivität (...) kann die objektive Wahrheit verständlich machen und letzten Seinssinn der Welt erreichen. Also nicht das Sein der Welt in seiner fraglosen Selbstverständlichkeit ist das an sich Erste (...), sondern das an sich Erste ist die Subjektivität und zwar als die das Sein der Welt naiv vorgebende und dann rationalisierende, was gleich gilt: objektivierende.« (Husserl 1936: 75f.)

Was Husserl in elaborierter Form vorführt (und was ich hier nur sehr verkürzt dargestellt habe), ist im Kern auch in Brouwers Philosophie angelegt, hier allerdings versehen mit reichlich mystischen Untertönen und in pathetisch resignativem Gestus. Seine (lebens-)philosophische Sicht auf die Welt hat er, noch als Student, in seiner Broschüre *Leven, Kunst en Mystiek* dargelegt.[42] Brouwers Philosophie ist strikt subjektivistisch (und über weite Strecken mit Schopenhauers Willensphilosophie verschnitten). Es ist das Subjekt, das kraft eines »Willensaktes« und zum Zwecke

42 Sie ist auf englisch auszugsweise abgedruckt in den von Arend Heyting herausgegebenen *Gesammelten Werken* Brouwers (Brouwer 1905).

instrumentellen Handelns die Welt kognitiv ordnet, beginnend mit der bereits erwähnten Einteilung des Ereignisflusses in »zeitliche Zweiheiten«, gefolgt von der »kausalen Einstellung«, bei der die geschiedenen Objekte oder Ereignisse in einen inneren Zusammenhang gebracht werden. Beide Kognitionsleistungen zusammen bezeichnet Brouwer als »mathematische Betrachtung«. Ihre Funktion besteht darin, instrumentelles Handeln, oder wie Brouwer es nennt: eine »mathematische Handlung«, zu ermöglichen (vgl. Brouwer 1928b: 418). Die kausale Beziehung, die der Mensch zu erkennen vermeint und die er »durch kühle Berechnung« für sein Handeln nutzt, ist nicht in der Außenwelt gegeben, sondern »eine nach außen wirkende Gedankenkraft im Dienste einer dunklen Willensfunktion des Menschen, der sich dadurch die Welt mehr oder weniger wehrlos unterwirft, in analoger Weise wie die Schlange ihre Beute wehrlos macht durch ihren hypnotisierenden Blick und der Tintenfisch durch Bespritzung mit seinem Sekret.« (Brouwer 1928b: 418)[43]

Was in den Wissenschaften der Natur als Attribut zugeschrieben wird, ist in Tat und Wahrheit eine Projektion – eine Leistung des erkennenden Subjekts, die jedoch nicht mehr als solche wahrgenommen wird: »In science whatever is perceived is placed outside the Self, in a world of perception independent of the Self; the bond with the Self, its only source and guide, is lost. It then constructs a mathematical-logical substratum which is completely alien to life, an illusion, and which acts in life as a Tower of Babel with its confusion of tongues.« (Brouwer 1905: 7) In seinem Drang, die Welt instrumentell zu beherrschen, hat sich der Mensch ein Gefängnis konstruiert, aus dem es kein Entrinnen mehr gibt. Was letztlich seine eigene Leistung ist, stellt sich ihm als etwas Fremdes und ihm Äußerliches entgegen. »Intellect has made him forfeit the staggering independence and directness of each of his rambling images by connecting them with each other rather than with the Self. In this way the Intellect made him persevere in a state of apparent security in a 'reality' which man in his arrogance had made himself, which he had tied to causality, but in which eventually he must feel totally powerless.« (Brouwer 1905: 3)

43 Oder etwas weniger blumig in einer – allerdings dennoch abgelehnten – Passage seiner Dissertation: »Man has the faculty, accompanying all his interactions with nature, of objectifying the world, of seeing in the world causal systems in time. This 'seeing', however, is a human act of externalization: there is no real existence of objective natural phenomena as can be ascribed to nature itself: the seeing originates in man, is an expression of man's will alone.« (Zit. in van Stigt 1980: 394)

Brouwers Welt ist eine Welt der Entfremdung. Es ist eine Welt, in der alles, auch Wissenschaft und Sprache, auf Unterwerfung ausgerichtet ist. Instrumentelle Vernunft prägt als Leitprinzip alle Lebensbereiche und macht auch vor der Sprache nicht halt. Kommunikation steht immer und ausnahmslos im Dienste strategischen Handelns. Sprechen ist für Brouwer »Willensauferlegung durch Laute«, und dies gilt auch für das Sprechen (oder Schreiben) im Medium einer formalen Sprache (Brouwer 1928b: 417). Der Glaube der Formalisten an die erkenntnisstiftende Funktion der Sprache ist für Brouwer pure Illusion. Sprache dient nicht der Verständigung, sondern ausschließlich der Beherrschung.

Die Welt, die Brouwer entstehen läßt, diese »sad world«, zu der es keine Umkehr gibt, trägt deutlich modernisierungskritische – und eminent frauenfeindliche – Züge.[44] Die Lebensphilosophie, die er seiner Begründung der Mathematik zugrunde legt, ist, so Walter van Stigt, »a romantic revolt against intellectualism and industrialization. He fulminates against all things human, and singles out the human intellect as the cause of all evil. He comdemns human progress and man's interference in the world, and as a latter day romantic he advocates a return to nature and the simple life.« (Van Stigt 1980: 387) Brouwer schreibt aus der Perspektive der Gegenmoderne. Seine philosophischen und mathematischen Überlegungen sind reaktiv entstanden. Sie sind eine Antwort – eine *gegenmoderne* Antwort – auf die moderne Welt (und die moderne Mathematik), an der er sich orientiert und von der er sich gleichzeitig abzusetzen sucht.[45] Diese 'moderne' gegenmoderne Haltung Brouwers ist, darauf komme ich in Kapitel 5 ausführlicher zu sprechen, ein wesentlicher Grund dafür, weshalb seine Ideen in den frühen 20er Jahren so großen Anklang fanden.

---

44 Zum Frauenbild Brouwers vgl. Mehrtens 1990: 266f.und van Stigt 1990: 30; 32f.

45 Dies ist die Interpretation von Mehrtens 1990, der Brouwer zusammen mit Henri Poincaré (1854 – 1912) und Felix Klein (1849 – 1925) als Exponenten der Gegenmoderne charakterisiert.

## 3. Die Gewißheit der Mathematik
### *Das beweistheoretische Programm David Hilberts*

> Der konsequente Intuitionist vergleicht den Formalisten mit einem Richter, der einen Mörder als moralisch einwandfrei bezeichnen würde, falls sein Verbrechen mit gerichtlichen Untersuchungsmitteln unentdeckbar wäre.
>
> *Abraham Fraenkel*[46]

Von seinem Anspruch und Programm her konnte man den Brouwerschen Intuitionismus tatsächlich als eine »Revolution« betrachten, wie Hermann Weyl 1921 pathetisch ausrief – wenn auch kaum als »bolschewistische Bedrohung«, wie ihn der englische Logiker Frank P. Ramsey vier Jahre später brandmarkte (Ramsey 1925: 173). Daß er aber tatsächlich nur ein »Putschversuch« war (Hilbert 1922: 15), und dazu noch ein mißlungener, hatte vermutlich auch mit dem Pragmatismus der mathematischen Gemeinschaft zu tun. Eine Übernahme der Brouwerschen Ideen hätte eine Komplizierung der mathematischen Argumentation bedeutet sowie den Verzicht auf einen beträchtlichen Teil der klassischen Mathematik, so daß Hilberts gegen Brouwer gerichtetes Diktum: »Aus dem Paradies, das Cantor uns geschaffen, soll uns niemand vertreiben können«, das Handlungsprinzip abgab für die meisten Mathematiker (Hilbert 1925: 88). Das unsichere Paradies Cantors schien um einiges attraktiver zu sein als die irdische Mangelwirtschaft Brouwers, zumal man zu dieser Zeit noch immer hoffen konnte, daß die eigene Tätigkeit durch Hilberts formalistisches Programm ihre endgültige Legitimation finden würde.

An die Ausarbeitung dieses Programms, das er zu Beginn dieses Jahrhunderts bloß skizziert hatte[47], machte sich Hilbert in den frühen 20er Jahren. Seine Beweistheorie sollte den Nachweis erbringen, daß sich die Mathematik auch dann widerspruchsfrei aufbauen läßt, wenn man tatsächlich den »Sprung ins Jenseits« (Weyl) vollzieht. Hilberts Zielsetzung war hochgespannt: Es ging ihm nicht um die Vermeidung bereits bekannter Widersprüche, dies hatten Bertrand Russell (1872 – 1970) mit seiner Typentheorie und Ernst Zermelo (1871 – 1953) mit seiner Axiomatisie-

46 Fraenkel 1924: 98.

47 In seinem 1904 auf dem *Internationalen Mathematikerkongreß* in Heidelberg gehaltenen Vortrag *Über die Grundlagen der Logik und der Arithmetik* (Hilbert 1905). Dieser Vortrag markiert einen gewissen Bruch mit den grundlagentheoretischen Vorstellungen, wie sie Hilbert im Rahmen seiner formalen Axiomatik entwickelt hatte (vgl. 1.). Er ist deshalb nicht unberechtigt, ihn bereits der zweiten Phase zuzuordnen; vgl. dazu ausführlich Peckhaus 1990.

rung der Cantorschen Mengenlehre bereits geleistet, sondern um den Nachweis, daß im Rahmen des aufgestellten (transfiniten) Axiomensystems Widersprüche überhaupt unmöglich sind.[48] Um dieses Ziel zu realisieren, entwickelte Hilbert eine Art Stufenprogramm:

»Der Grundgedanke meiner Beweistheorie ist folgender: Alles, was im bisherigen Sinne die Mathematik ausmacht, wird streng formalisiert, so daß die eigentliche Mathematik oder die Mathematik in engerem Sinne zu einem Bestande an Formeln wird. Diese unterscheiden sich von den gewöhnlichen Formeln der Mathematik nur dadurch, daß außer den gewöhnlichen Zeichen noch die logischen Zeichen, insbesondere die für 'folgt' ( -->), und für 'nicht' (¯) darin vorkommen. Gewisse Formeln, die als Bausteine des formalen Gebäudes der Mathematik dienen, werden Axiome genannt. Ein Beweis ist eine Figur, die uns als solche anschaulich vorliegen muß (...) Eine Formel soll beweisbar heißen, wenn sie entweder ein Axiom ist bzw. durch Einsetzen aus einem Axiom entsteht oder die Endformel eines Beweises ist. Zu der eigentlichen so formalisierten Mathematik kommt eine gewissermaßen neue Mathematik, eine Metamathematik, die zur Sicherung jener notwendig ist, in der – im Gegensatz zu den rein formalen Schlußweisen der eigentlichen Mathematik – das inhaltliche Schließen zur Anwendung kommt, aber lediglich zum Nachweis der Widerspruchsfreiheit der Axiome. In dieser Metamathematik wird mit den Beweisen der eigentlichen Mathematik operiert und diese letzteren bilden selbst den Gegenstand der inhaltlichen Untersuchung. Auf diese Weise vollzieht sich die Entwicklung der mathematischen Gesamtwissenschaft in beständigem Wechsel auf zweierlei Art: durch Gewinnung neuer beweisbarer Formeln aus den Axiomen mittels formalen Schließens und andrerseits durch Hinzufügung neuer Axiome nebst dem Nachweis der Widerspruchsfreiheit mittels inhaltlichen Schließens.« (Hilbert 1923: 34f.)

In diesem Passus sind bereits die wesentlichen Punkte der Hilbertschen Beweistheorie (bzw. seiner 'Metamathematik', wie er sie auch nannte) angesprochen: Die klare *Trennung zwischen drei Ebenen* – die Ebene der klassischen Mathematik, die Ebene der formalen Mathematik und die metamathematische Ebene. Der *Einbezug der Logik* in den Widerspruchsnachweis und schließlich die Vorstellung, daß sich die klassische Mathematik tatsächlich vollständig *axiomatisch aufbauen und formalisieren* läßt (eine Vorstellung, die Kurt Gödel acht Jahre später widerlegte). Nicht explizit angesprochen ist hier das zentrale Postulat, daß der Nachweis der Widerspruchsfreiheit mit *finiten* Mitteln zu erfolgen habe, und zwar, das ist der springende Punkt, geht es um den Nachweis der Widerspruchsfreiheit von *transfiniten* Axiomen, d.h. von Axiomen, die einen unendlichen Individuenbereich charakterisieren. Es ist diese Zusammenführung

48 Es genüge nicht, führt Hilbert in seinem Vortrag *Axiomatisches Denken* aus, »vorhandene Widersprüche zu vermeiden (...), die prinzipielle Forderung der Axiomenlehre muß vielmehr weitergehen, nämlich dahin, zu erkennen, daß jedesmal innerhalb eines Wissensgebietes auf Grund des aufgestellten Axiomensystems Widersprüche überhaupt unmöglich sind« (Hilbert 1918: 7).

von finiten Methoden und transfiniten Annahmen, die die Pointe der Hilbertschen Argumentation ausmacht und die Hauptdifferenz zum Brouwerschen Programm markiert: »Auf dem Boden des Finiten soll also die freie Handhabung und volle Beherrschung des Transfiniten erreicht werden!« (Hilbert 1923: 37)

In Hilberts Beweistheorie ging es also darum, die Widerspruchsfreiheit der Mathematik nachzuweisen, und zwar mit ausschließlich *mathematischen* Mitteln. Damit ist aber, wie Henri Poincaré schon sehr früh kritisch bemerkte, ein prinzipielles Problem verknüpft, nämlich die potentielle Zirkularität des Unterfangens: Der Nachweis der Widerspruchsfreiheit erfordert Beweismittel, deren eigene Widerspruchsfreiheit erst einmal zu belegen wäre.[49] Um diesen Zirkel zu umgehen, hat, so Hilberts (verzögerte) Antwort auf diese Kritik, der metamathematische Nachweis mit Mitteln zu erfolgen, die auch von einem intuitionistischen Standpunkt aus vertretbar sind, mit Methoden also, die finit sind und die, wie Hilbert schreibt, auf »rein anschaulichen Überlegungen« beruhen, »ohne daß dabei eine bedenkliche oder problematische Schlußweise zur Anwendung gelangt« (Hilbert 1923: 36). Und damit waren insbesondere jene Vorstellungen gemeint, um deren Unbedenklichkeitstest es gerade ging, d.h. ausgeschlossen waren transfinite Annahmen und Schlußweisen, wozu vor allem auch die Anwendung des Prinzips des *tertium non datur* auf unendliche Mengen gehörte. Paul Bernays verdeutlicht Hilberts finitistische Position am Beispiel von Existenzaussagen in der Arithmetik:

»Insbesondere in der elementaren Zahlentheorie haben wir es nur mit solchen Existenzaussagen zu tun, die sich auf eine ganz bestimmte, vorweisbare Gesamtheit von Zahlen oder einen bestimmten, anschaulich vorführbaren Prozeß oder auf beides gemeinsam, d.h. auf eine durch einen vorführbaren Prozeß zu gewinnende Gesamtheit von Zahlen beziehen. Beispiele derartiger Existenzbehauptungen sind: 'Zwischen 5 und 10 gibt es eine Primzahl', nämlich 7 ist eine Primzahl. 'Zu jeder Zahl gibt es eine größere', nämlich wenn n eine Zahl ist, so bilde man n + 1; diese Zahl ist größer als n (...) In jedem dieser Fälle wird die Existenzaussage durch eine nähere Angabe präzisiert; die Existenzbehauptung hält sich an die in der anschaulichen Vorstellung vollziehbaren Bildungsprozesse und nimmt nicht Bezug auf eine Mannigfaltigkeit aller Zahlen. Diese elementare, an die Bedingungen der grundsätzlichen Vorstellbarkeit sich bindende Betrachtungsweise wollen wir nach Hilbert als den *finiten* Standpunkt bezeichnen und im gleichen Sinne von finiten Methoden, finiter Überlegung und finiten Schlüssen sprechen.« (Bernays 1930: 34)[50]

49 Vgl. ausführlicher zu Poincarés 'petitio argument' Goldfarb 1988.

50 Oder etwas allgemeiner formuliert: Im Rahmen der metamathematischen Untersuchung sind nur Verfahrensweisen zugelassen, die folgende Bedingungen erfüllen: »(1) Es wird stets nur eine endliche Anzahl von Gegenständen und Funktionen be-

Mit diesen Einschränkungen hat sich Hilbert, wie Brouwer 1928 denn auch triumphierend vermerkte, wesentliche Kritikpunkte des Intuitionismus zu eigen gemacht (vgl. auch Heyting 1934: 53ff.). Der Formalismus habe vom Intuitionismus, »nur Wohltaten empfangen und weitere Wohltaten zu erwarten«, so Brouwers Fazit, nachdem er in einem akribischen Vergleich vorgeführt hatte, wer (nämlich er) die entscheidenden Ideen zum ersten Mal formuliert hat und wann sie von Hilbert übernommen worden sind. Die formalistische Schule täte folglich besser daran, dem Intuitionismus »Anerkennung zu zollen, statt gegen denselben im höhnischen Ton zu polemisieren, und dabei nicht einmal die richtige Erwähnung der Autorschaft einzuhalten.« Und schließlich, so Brouwers Hauptkritik, sei Hilberts Beweistheorie nach wie vor bloß eine Absichtserklärung: der Nachweis der Widerspruchsfreiheit stehe immer noch aus (Brouwer 1928a: 412).

Daß es Hilbert bis zu diesem Zeitpunkt nicht gelungen war, einen solchen Nachweis zu führen, hatte prinzipielle Gründe, wie Kurt Gödel drei Jahre später bewies. Damals glaubte man jedoch noch, daß es an der Schwierigkeit der Problemstellung lag. Denn im Falle eines transfiniten Axiomensystems – und das gilt insbesondere für die Arithmetik, bei der die Modellmethode, wie bereits erwähnt, versagt (vgl. S. 29) – läßt sich der Nachweis der Widerspruchsfreiheit nur absolut und negativ führen, d.h. durch den Nachweis, daß aus den gewählten Axiomen kein Widerspruch resultiert.[51] Ein solcher Unmöglichkeitsbeweis setzt aber, und damit komme ich auf den Anfang zurück, eine vollständige *Formalisierung* voraus, und was mit diesem – in meinem Zusammenhang ganz entscheidenden Begriff – gemeint ist, werde ich im folgenden etwas näher ausführen.

Transfinite Aussagen lassen sich nicht, darin geht Hilbert mit Brouwer einig, gedanklich (re-)konstruieren und dadurch begründen. Denn »unser

trachtet. (2) Alle betrachteten Funktionen sind wohldefiniert in dem Sinn, daß sie die eindeutige Berechnung ihres Wertes für jedes Argument gestatten. (3) Niemals wird die Menge aller Objekte einer unendlichen Gesamtheit betrachtet. (4) Die Existenz eines Objektes wird nur zugleich mit der Angabe der Mittel zu seiner Konstruktion behauptet. (5) Mit der Behauptung der Gültigkeit eines Argumentes oder Satzes für alle x ist gemeint, daß man für jedes einzelne x das fragliche Argument wiederholen kann, das somit nur einen Prototyp all dieser einzelnen Argumente darstellt.« (Jacques Herbrand 1931, zit. in Krämer 1988: 140)

51 Diese Argumentation wird systematisch aufgebaut in Hilbert/Bernays 1934, insb. Kap. 1.

Denken ist«, wie Hilbert schreibt, »finit« (Hilbert 1923: 42).[52] Ihre Rechtfertigung muß über einen anderen Weg erfolgen, und zwar über den Nachweis, daß ihre Annahme nicht zu einem Widerspruch führt. Um dies zu leisten, müssen aber, und das ist die entscheidende Idee Hilberts, die transfiniten Aussagen in ein *endliches* System überführt werden, und genau dies geschieht durch die Formalisierung. Ein formales System gibt, wie es Judson C. Webb formuliert, »a 'finite picture' of infinity (...) Though such systems may 'refer' to infinity, like a perspective painting with its vanishing points, they themselves contain only a *finite* number of symbols and rules of the kind that one could effectively enumerate all their proofs, and hence also the theorems and their negations.« (Webb 1980: 7) Im Prinzip läßt sich dann Punkt für Punkt prüfen, ob eine Formel und gleichzeitig ihre Negation ableitbar ist, und genau dies ist die Aufgabe der Metamathematik.

Hilberts beweistheoretisches Programm erforderte also zunächst einmal, daß die klassische Mathematik (zusammen mit den logischen Schlußregeln) von Grund auf axiomatisch aufgebaut und unter Verwendung einer formalen Sprache vollständig formalisiert wird. Die Mathematik nimmt damit die Gestalt eines kalkülisierten Axiomensystems an, innerhalb dessen, so die Annahme Hilberts, sich alle wahren Sätze der klassischen Mathematik durch rein syntaktische Operationen erzeugen lassen. Ein formalisiertes axiomatisches System besteht, vereinfacht ausgedrückt, aus logischen und nicht-logischen Axiomen sowie aus einer Reihe von Schlußregeln, und sein Aufbau setzt eine Zeichensprache voraus, d.h. ein Medium, in dem die Bestandteile des Systems, die Axiome, Schlußregeln und Theoreme, formal, d.h. in Termini von Zeichen und Zeichenkonfigurationen ausgedrückt werden können. Die Bausteine dieser Sprache bestehen aus einem Grundbestand von (bedeutungslosen) Zeichen, aus einem sog. 'Alphabet', und einer beschränkten Anzahl von Regeln, die festlegen, auf welche Weise die Zeichen zu Termen (= 'Wörter') bzw. Formeln (= 'Sätze') kombiniert werden dürfen. Gewisse Formeln werden als Axiome deklariert. Zusammen mit den Schlußregeln legen sie implizit fest, welche Folgerungen abgeleitet werden können. Ein

52 Diese Übereinstimmung hebt besonders auch Hermann Weyl hervor. Trotz heftiger Polemik gegen den Brouwerschen Intuitionismus sei auch Hilbert der Ansicht, daß »die Kraft des inhaltlichen Denkens nicht weiter reicht als Brouwer behauptet, daß sie die 'transfiniten' Schlußweisen in der Mathematik nicht zu tragen imstande ist, daß es keine Rechtfertigung für alle die transfiniten Aussagen der Mathematik als inhaltlicher, einsichtiger Wahrheiten gibt« (Weyl 1925: 534).

mathematischer Satz gilt dann als bewiesen, wenn es gelingt, ihn gemäß der Schlußregeln aus den Axiomen abzuleiten, und zwar über eine schrittweise und im Prinzip rein mechanische Umformung der Zeichenketten. An die Stelle eines inhaltlichen tritt also ein rein formaler Wahrheitsbegriff.

Mit der Formalisierung wird die Mathematik in gewissem Sinne zu einem 'Spiel', was viele Zeitgenossen, mitunter etwas befremdet, auch vermerkten. »Die neue, Hilbert eigentümliche Wendung ist die« schrieb etwa Hermann Weyl 1924, »daß er an den Sätzen der Mathematik ihre inhaltliche Bedeutung fahren läßt und sie zu einem Formelspiel entleert.« (Weyl 1924: 449) Was das genau heißt, führt Weyl am Beispiel des Schachspiels vor:

»Die Sätze werden zu bedeutungslosen, aus Zeichen aufgebauten Figuren, die Mathematik ist nicht mehr Erkenntnis, sondern ein durch gewisse Konventionen geregeltes *Formelspiel*, durchaus vergleichbar dem Schachspiel. Den Steinen des Schachspiels entspricht ein beschränkter Vorrat an *Zeichen* in der Mathematik, einer beliebigen Aufstellung der Steine auf dem Brett die Zusammenstellung der Zeichen zu einer *Formel*. Eine oder wenige Formeln gelten als *Axiome*; ihr Gegenstück ist die vorgeschriebene Aufstellung der Steine zu Beginn einer Schachpartie. Und wie hier aus einer im Spiel auftretenden Stellung die nächste hervorgeht, indem ein Zug gemacht wird, der bestimmten Zugregeln zu genügen hat, so gelten dort formale *Schlußregeln*, nach denen aus Formeln neue Formeln gewonnen, 'deduziert' werden können. Unter einer spielgerechten Stellung im Schach verstehe ich eine solche, welche aus der Anfangsstellung in einer den Zugregeln gemäß verlaufenen Spielpartie entstanden ist. Das Analoge in der Mathematik ist die *beweisbare* (oder besser, die *bewiesene*) Formel, welche auf Grund der Schlußregeln aus den Axiomen hervorgeht. Gewisse Formeln von anschaulich beschriebenem Charakter werden als *Widersprüche* gebrandmarkt; im Schachspiel verstehen wir unter einem Widerspruch etwa jede Stellung, in welcher 10 Damen der gleichen Farbe auftreten. Formeln anderer Struktur reizen, wie die Mattstellung den Schachspieler, den Mathematikspielenden dazu, sie durch eine geschickte Aneinanderkettung der Züge als Endformeln in einer richtig gespielten Beweispartie zu gewinnen.« (Weyl 1925: 535)

Bis hierhin, so Hermann Weyl, »ist alles Spiel, nicht Erkenntnis«. Um Erkenntnis geht es erst auf der Meta-Ebene der *Metamathematik*, wo man das Spiel nicht mehr spielt, sondern über dessen Regeln nachdenkt. Die Metamathematik macht inhaltliche Aussagen, und der Gegenstand, von dem sie handelt, ist die formalisierte Mathematik. Metamathematische Aussagen sind Aussagen über die logischen Beziehungen zwischen den Zeichen und Zeichenketten.

So macht z.B. der metamathematische Satz

»'2 + 3 = 5' ist eine arithmetische Formel«

eine inhaltliche Aussage über den formalen Ausdruck

$$2 + 3 = 5,$$

der ausschließlich aus arithmetischen Zeichen aufgebaut, d.h. eine Formel ist.[53] Auf der Ebene der Metamathematik präsentiert sich der Kalkül als ein im Prinzip überschaubares Objekt, als eine, wie es Ernest Nagel und James R. Newman formulieren, »abstrakte Zeichnung oder ein Mosaik«, das auf seine Struktureigenschaften hin überprüft werden kann. »Wie ein aufgeschnittenes Modell einer arbeitenden Maschine zeigt uns (die Formalisierung) die Form und Funktion in unverhüllter Klarheit. Wenn ein System formalisiert worden ist, liegen die logischen Beziehungen zwischen mathematischen Sätzen offen vor uns; man kann die Formgesetze verschiedener 'Ketten' von 'sinnlosen' Zeichen erkennen, wie sie zusammenhängen, kombiniert werden, wie eine in der anderen enthalten ist usf.« (Nagel/Newman 1958: 32)

Dies zu erkennen, ist die Aufgabe der Metamathematik. Ihr Grundprinzip läßt sich wiederum am Beispiel des Schachspiels veranschaulichen (vgl. Nagel/Newmann 1958: 33). Die Figuren des Spiels entsprechen den Zeichen des Kalküls, ihre Ausgangsstellung bei Spielbeginn den Axiomen, die zulässigen Stellungen der Figuren den Formeln und die Spielregeln den Ableitungsregeln. Für das Spiel selbst spielt es keine Rolle, wofür die Figuren stehen und wie sie aussehen.[54] Weder die Figuren noch ihre Stellungen beziehen sich auf etwas außerhalb des Spieles. Sie sind so referenzlos, so bedeutungslos wie die Zeichen und Zeichenketten des Kalküls. Im Gegensatz dazu können aber auf einer Metaebene sehr wohl inhaltliche Aussagen gemacht werden, d.h. Aussagen, die sich im Falle des 'Metaschachs' auf mögliche Spielverläufe beziehen, im Falle der Mathematik auf die Beziehung zwischen den Axiomen und den abgeleiteten Formeln. Solche Meta-Aussagen – z.B. die Aussage, daß es

53 Das Beispiel stammt aus Nagel/Newman 1958: 33.

54 Deshalb wird auch die Drohung: »Jetzt werde ich mir eine Königin anschaffen mit ganz furchtbaren Augen, die wird alles aus dem Feld schlagen«, am Spielausgang wenig ändern, wie Wittgenstein seinen Wiener Zuhörern erklärt (zit. in Waismann 1984: 104).

für Weiß genau zwanzig mögliche Eröffnungszüge gibt –, lassen sich mit endlichen Mitteln beweisen, indem man der Reihe nach jede der endlich vielen Anordnungen untersucht, die unter den gegebenen Bedingungen (in diesem Beispiel: unter der Bedingung der Eröffnungskonstellation) möglich sind. Und auf ganz ähnliche Weise müßte sich, dies war die Idee der Hilbertschen Beweistheorie, beweisen lassen, daß in einem gegebenen formalen System nicht eine Formel und gleichzeitig ihre Negation ableitbar ist. »Jede solche Ableitung, jeder Beweis«, so Otto Blumenthals Beschreibung der metamathematischen Vorgehensweise, »besteht aus einer *endlichen* Anzahl untereinander geschriebener Formeln. Auf diesen Umstand gründet sich (...) die Methode zum Beweis der Widerspruchslosigkeit des Axiomensystems. Die widerspruchsvolle Formel (man kann ihr immer die Form $0 \neq 0$ geben) muß nämlich als Schlußglied einer *endlichen* Kette von Formeln erscheinen. Man gehe nun den vorgelegten 'Beweis' rückwärts durch und weise aus dem formalen Charakter der einzelnen Zeilen nach, daß die widerspruchsvolle letzte Zeile nicht an sie anschließen kann.« (Blumenthal 1935: 423f.)

Formalisierung überführt die klassische inhaltliche Mathematik in ein System von Formeln. »An Stelle der inhaltlichen mathematischen Wissenschaft, welche durch die gewöhnliche Sprache mitgeteilt wird, (erhalten) wir nunmehr einen Bestand von Formeln mit mathematischen und logischen Zeichen, welche sich nach bestimmten Regeln aneinander reihen. Den mathematischen Axiomen entsprechen gewisse unter den Formeln und dem inhaltlichen Schließen entsprechen die Regeln, nach denen die Formeln aufeinander folgen: das inhaltliche Schließen wird also durch ein *äußeres Handeln nach Regeln* ersetzt.« (Hilbert 1925: 95) Alan Turing hat den Hilbertschen Formalismus zu Ende gedacht und mit seinem Maschinenmodell, wie Kurt Gödel rückblickend schrieb, »a precise and unquestionably adequate definition of the general concept of formal system« geliefert: »A formal system can simply be defined to be any mechanical procedure for producing formulas, called provable formulas.« (Gödel 1964: 71f.) Dies, und nicht so sehr seine Lösung des Entscheidungsproblems, erwies sich im nachhinein als seine entscheidende mathematische Leistung. Deshalb möchte ich – trotz Gefahr unzulässiger Trivialisierung – an einem einfachen Beispiel einige Begriffe und Grundkonzepte einführen und gleichzeitig an ihm verdeutlichen, was ein formales System ist und inwiefern das Operieren in ihm einem mechanischen Prozeß gleichkommt. Ich beziehe mich dabei auf Douglas Hofstadters MIU-System (Hofstadter 1985: 37ff.).

Ausgangspunkt ist die Symbolkette MI. Sie bildet das (einzige) Axiom dieses Systems. Die Regeln, nach denen die Symbole bzw. Symbolketten transformiert werden können, sind folgende:

REGEL 1: Wenn der letzte Buchstabe einer Kette I ist, kann man am Schluß ein U zufügen. Also etwa: MIUUUUMMMII ---> MIUUUUMMMIIU.

REGEL 2: Eine Kette der allgemeinen Form Mx kann transformiert werden in eine Kette der Form Mxx. x steht dabei für eine beliebige Symbolfolge. Also etwa: MI ---> MII, oder: MUUM ---> MUUMUUM

REGEL 3: Die Symbolfolge III läßt sich ersetzen durch U. D.h. MUMIIIMUM läßt sich in MUMUMUM transformieren, MIIII in MUI bzw. in MIU.

REGEL 4: Die Symbolfolge UU kann gestrichen werden. Aus MUUU wird dann MU, aus MMUUUMM wird MMUMM.

Ausgangspunkt ist, wie gesagt, die Kette MI, und die Frage, die Hofstadter stellt, ist die: Läßt sich im Rahmen dieses Systems MU beweisen, d.h. in Befolgung der angegebenen Regeln formal herleiten? Versucht man es, wird man bald einmal merken, daß die Lösung, der Beweis, auf alle Fälle nicht leicht zu haben ist – sofern es ihn überhaupt gibt.[55]

| | |
|---|---|
| Axiom | MI |
| 1. Anwendung der Regel 1*[56] | MIU |
| 2. Anwendung der Regel 2• | MIUIU |
| 3. Anwendung der Regel 2• | MIUIUIUIU |
| 4. Anwendung der Regel 2• | MIUIUIUIUIUIUIUIU |
| 5. Anwendung der Regel 2• | MIUIUIUIUIUIUIUIUIUIUIUIUIUIUIUIU |

Offensichtlich läßt sich nur noch die 2. Regel anwenden. Auf diese Weise scheint MU niemals erzeugbar zu sein. Es gibt jedoch eine Alternative, denn ganz am Anfang haben wir zwei Regeln zur Auswahl: auf MI läßt sich auch Regel 2 anwenden.[57]

55 Die Lösung findet sich auf S. 62, Anmerkung 64.
56 Situationen, bei denen zwischen zwei Regeln gewählt werden kann, habe ich mit einem * gekennzeichnet und mit **, wenn drei Regeln zur Verfügung stehen. Situationen, bei denen nur eine Regel zur Verfügung steht, sind mit • gekennzeichnet.
57 Was deutlich macht, daß in einem formalen System nicht von vornherein festgelegt ist, welche Regel (oder Instruktion) wann anzuwenden ist.

| | |
|---|---|
| Axiom | MI |
| 1. Anwendung der Regel 2* | MII |
| 2. Anwendung der Regel 2* | MIIII |
| 3. Anwendung der Regel 1** | MIIIIU |
| 4. Anwendung der Regel 3* | MUIU |
| 5. Anwendung der Regel 2• | MUIUUIU |
| 6. Anwendung der Regel 4* | MUIIU |
| 7. Anwendung der Regel 2• | MUIIUUIIU etc. |

Auch bei dieser Regelfolge läßt sich MU nicht in wenigen Schritten beweisen, und es ist keineswegs erwiesen, ob MU überhaupt ableitbar ist. Dasselbe Problem kann sich auch in der ernsthaften Mathematik stellen. Wie läßt sich, außer durch endloses Durchprobieren, entscheiden, ob eine bestimmte Formel, etwa die Formel MU, in einem gegebenen formalen System ableitbar ist oder nicht? Gibt es, anders ausgedrückt, ein allgemeines Verfahren, mit dessen Hilfe man entscheiden kann, ob MU (bzw. eine beliebige mathematische Formel) im Rahmen eines bestimmten formalen Systems beweisbar ist? Diese Frage bezeichnet man als *Entscheidungsproblem*, und für Hilbert war sie eine Frage, die das »Wesen des mathematischen Denkens tief berührt« (Hilbert 1918: 8). Beantwortet wurde sie erst Mitte der 30er Jahre, dafür aber von mehreren Mathematikern gleichzeitig. Ich komme in Kapitel 2 darauf zurück.

Am Beispiel des MIU-Systems lassen sich eine Reihe von mathematischen Begriffen einführen. Die Ausgangskette MI ist ein *Axiom*. Sämtliche Ketten, die durch Anwendung der Regeln hergeleitet werden können, z.B. MIUIU oder MIIII oder MUIIUUIIU, sind *Theoreme*. Theoreme sind formal abgeleitete, d.h. *bewiesene* mathematische Sätze. Ein formales System besteht also aus mindestens einem Axiom – im Falle des Hilbertprogramms aus logischen und nicht-logischen Axiomen – sowie aus Schlußregeln, nach denen aus den Axiomen durch schrittweise Umbildung weitere Formeln gebildet werden können. Über die Axiome und Schlußregeln sind implizit alle Symbolreihen festgelegt, die im Rahmen dieses Systems gebildet werden können – obschon es, wie das MU-Beispiel zeigt, eine praktisch endlose Arbeit sein kann, diese Formeln auch tatsächlich herzuleiten.

Ein (formaler) *Beweis* ist eine Folge von Formeln, von denen die erste ein Axiom ist, die letzte das zu beweisende Theorem darstellt und die dazwischenliegenden Zeichenketten entweder Axiome sind oder bereits abgeleitete Formeln.

Entsprechend stellt die Formelfolge

MI
MII
MIIII
MUI

einen Beweis für MUI dar. Formales Beweisen hat entsprechend nichts mit inhaltlichen Überlegungen zu tun. Es ist, wie Hilbert schreibt, ein »äußeres Handeln nach Regeln« (Hilbert 1925: 95). Dies war denn auch der Grund dafür, weshalb viele Mathematiker die neue Mathematik als bloßen »Formelmechanismus« (Frege) empfanden – ein Gefühl, dem Alan Turing etwas später mit seinem Maschinenmodell handfeste Gestalt verlieh.

Läßt sich eine Formel und gleichzeitig ihre Negation herleiten, dann hat sich das System als (formal) *widersprüchlich* erwiesen. Um die Widerspruchsfreiheit eines formalen Systems nachzuweisen, muß folglich umgekehrt gezeigt werden, daß bestimmte Formeln im Rahmen dieses Systems niemals beweisbar sind. Dies ist die Aufgabe der Metamathematik.

Die Zeichen M, I und U bilden das *Alphabet* dieses einfachen formalen Systems. In einem komplexeren formalen System gäbe es noch Regeln, die die 'Grammatik' des Formalismus definieren, d.h. festlegen, in welcher Weise die Symbole zu Termen und diese wiederum zu Formeln zu verknüpfen sind. Die Symbolketten selbst sind streng *linear* angeordnet, d.h. sie dürfen nur in einer Richtung (von links nach rechts) gelesen werden. MUI und IUM bilden folglich zwei verschiedene Symbolketten (im Gegensatz etwa zum römischen Ziffernsystem, bei dem das Linearitätsprinzip noch nicht ausgebildet war).

Die Schlußregeln des formalen Systems, in unserem Beispiel die Regeln 1 – 4, bilden einen Kalkül. Ein *Kalkül* ist in der Formulierung von Heinz Bachmann, »ein System endlich vieler Regeln oder Anweisungen, durch die gegebene Wörter (d.h. Formeln, B.H.) schrittweise in andere Wörter umgewandelt werden« (Bachmann 1983: 194).[58] Operativ eingesetzte Kalküle sind 'symbolische Maschinen'. Was damit genau gemeint

---

58 Oder in der Formulierung von Sybille Krämer: »Ein Kalkül ist eine Herstellungsvorschrift, nach welcher aus einer begrenzten Menge von Zeichen unbegrenzt viele Zeichenkonfigurationen hergestellt werden können.« (Krämer 1988: 59) Vgl. zum Kalkülbegriff auch Hermes 1978: 31ff.; Lorenzen 1980: 29.

ist, wird bei der Diskussion von Turings Maschinenmodell deutlich werden. Im Rahmen eines Kalküls erfolgt die Manipulation der Zeichen ohne Bezugnahme auf ihre mögliche Bedeutung. Das Operieren mit den Symbolen vollzieht sich losgelöst von ihrer Interpretation. Die 'Objekte', die manipuliert werden, die Zeichen und Zeichenfolgen, sind bloß Markierungen, Striche auf dem Papier, die inhaltlich nicht gedeutet werden. Diese Entkoppelung von Manipulation und Interpretation, von Syntax und Semantik, macht den Umgang mit geistigen Objekten zu einem objektivierbaren und rein mechanischen Prozeß (vgl. Krämer 1991). Geistige Tätigkeiten, rechnen z.B. oder logisch folgern, werden damit auf ein Verfahren reduziert, auf eine Technik, die im Prinzip allen zugänglich ist, sogar, wie Turing später bewies, einer Maschine.

Bis zu Hilbert hatte die Mathematik trotz ihres hoch abstrakten Charakters immer noch einen – wenn auch im Zuge der 'anti-intuitiven' Wende im 19. Jahrhundert zunehmend problematisierten – Bezug gehabt zu einer wie auch immer gearteten Außenwelt. Dies galt nicht nur für die Geometrie, wo sich, wie Freges Kritik an Hilberts formaler Bestimmung der geometrischen Grundbegriffe zeigte, das Postulat einer Rückbindung an die Anschauung noch lange halten konnte, sondern auch für die Arithmetik. Noch Dedekind hat seine neuen, 'künstlichen' Zahlen außerhalb der Mathematik zu verankern versucht – in der elementaren Fähigkeit des menschlichen Geistes, Dinge aufeinander zu beziehen und sie symbolisch vorstellig zu machen (Dedekind 1888).[59] Erst Giuseppe Peano hat mit seiner Axiomatik den Schritt getan, der mit Hilberts formalistischer Mathematik dann zum Programm wurde. Mit seinem in einer rein formalen Sprache formulierten Axiomensystem für die natürlichen Zahlen (1889) bricht Peano endgültig mit der Tradition, indem auf nichts mehr außerhalb des Formalismus Bezug genommen wird. Peano nimmt, wie Herbert Mehrtens schreibt, »'die Zahl' als eines der Zeichen, die in der mathematischen Sprache bewegt werden, und macht mit den Axiomen einen Vorschlag für die Regeln des Gebrauchs dieses Zeichens. So gesehen wird eine Schriftsprache mit scharfen, allgemein gültigen Gebrauchsregeln entwickelt, auf die jeder Sprecher verpflichtet werden

59 »Verfolgt man genau, was wir bei dem Zählen der Menge oder Anzahl von Dingen thun, so wird man auf die Betrachtung der Fähigkeit des Geistes geführt, Dinge auf Dinge zu beziehen, einem Dinge ein Ding entsprechen zu lassen, oder ein Ding durch ein Ding abzubilden, ohne welche Fähigkeit überhaupt kein Denken möglich ist. Auf dieser einzigen, auch sonst ganz unentbehrlichen Grundlage muß nach meiner Ansicht (...) die gesammte Wissenschaft der Zahlen errichtet werden.« (Dedekind 1888: IV)

kann, weil er dabei nichts anderes als diese Sprache im Kopf hat. Damit aber grenzt sich die Mathematik in aller Schärfe von ihren Nachbarn, den Naturwissenschaften, der Technik, auch der Philosophie ab, die ja immer über 'etwas' ihre Rede führen, es zumindest vorgeben. Aus den 'natürlichen', 'negativen', 'imaginären' Zahlen wurden Symbole mit vollständig fixierten Gebrauchsregeln.« (Mehrtens 1990: 41)

Was im letzten Drittel des vergangenen Jahrhunderts vorgedacht wurde, hat Hilbert zum Programm gemacht. Die Gegenstände der Mathematik, die Punkte, Zahlen oder Geraden, haben keine außersymbolische Bedeutung mehr. Existenz haben sie allein im Rahmen und aufgrund des vom Mathematiker im Prinzip frei gesetzten formalen axiomatischen Systems (vgl. S. 25). Die Objekte der Mathematik, die 'Dinge' z.B., die Hilbert in seinen *Grundlagen der Geometrie* einführt, die 'Punkte', 'Geraden' und 'Ebenen', sind nur noch Bausteine eines in sich geschlossenen syntaktischen Systems. Man kann sie 'x' nennen oder 'Punkt' oder 'Bierseidel'. Was ihnen Bedeutung verleihen könnte, gehört nicht zum Bereich der Mathematik. Der von der formalen Axiomatik erzielte Fortschritt bestehe darin, schreibt Albert Einstein 1921, für dessen Relativitätstheorie die Hilbertsche Auffassung der Geometrie von großer Bedeutung war, »daß durch sie das Logisch-Formale vom sachlichen oder anschaulichen Gehalt sauber getrennt wurde (...) Diese Axiome sind freie Schöpfungen des menschlichen Geistes (...) Die Axiome definieren erst die Gegenstände, von denen die Geometrie handelt.« (Zit. in Hans Freudenthal 1957: 114)

Die axiomatische Methode, die Hilbert am Beispiel der Geometrie vorführte, war allerdings erst ein erster Schritt in Richtung einer vollständigen Formalisierung, wie er sie dann später, in der zweiten Phase seines Formalisierungsprogramms, als Grundlage für seine beweistheoretischen Untersuchungen forderte. Formal definiert waren nur die geometrischen Grundbegriffe, alle anderen Begriffe, die logischen und arithmetischen, blieben immer noch inhaltlich bestimmt. Im Gegensatz dazu sind in einem vollständig kalkülisierten Axiomensystem sämtliche Begriffe formal definiert und im Medium einer formalen Sprache kodifiziert. Das MIU-System war dafür ein ungebührlich einfaches Beispiel.

Auf diese zunehmend radikalere Fassung der Formalisierungsidee weist auch Paul Bernays 1922 in seinem Geburtstags-Aufsatz hin: »So wie er ehedem die Grundbeziehungen und die Axiome der Geometrie ihres anschaulichen Inhalts entkleidete, so schaltet er nun aus den Beweisen der Arithmetik und Analysis, die er zum Gegenstand seiner Untersuchung macht, den gedanklichen Inhalt der Schlüsse aus, indem er die Formelsysteme, durch welche sich jene Beweise in dem Logikkalkül darstellen, losgelöst von ihrer inhaltlich-logischen Interpretation als das unmittelbare Objekt der Betrachtung nimmt und somit die Beweisführungen der Analysis durch ein rein formales Handeln ersetzt, welches mit bestimmten Zeichen nach festen Regeln stattfindet. Durch diese Betrachtungsweise, in welcher die Absonderung des Spezifisch-Mathematischen von allem Inhaltlichen ihren Gipfelpunkt erreicht, gewinnt die Hilbertsche Ansicht von dem Wesen der Mathematik und der axiomatischen Methode erst ihren wirklichen Abschluß.« (Bernays 1922: 98) Das Ergebnis ist ein reiner Kalkül, eine syntaktische Maschinerie, die, einmal in Gang gesetzt, Zeichenketten produziert, die dann zum Gegenstand der metamathematischen Untersuchung werden. Erst hier ist genau genommen jene Phase erreicht, in der die Mathematik zu einem in sich geschlossenen Zeichensystem wird.

In der Hilbertschen Auffassung der Mathematik wird die Beziehung zwischen Zeichen und Bezeichnetem endgültig abgebrochen. »Die Gegenstände der Zahlentheorie (sind) die Zeichen selbst« (Hilbert 1922: 18) – und nicht mehr das, worauf sie verweisen könnten. »Der idealistischen Einstellung, für welche die Zahlen ideale Objekte sind oder aus einem Akt des reinen Bewußtseins entspringende Möglichkeiten, tritt hier«, so Hermann Weyl in einem markanten Vergleich, »eine 'anthropistische' Einstellung gegenüber, die das konkrete Tun des Menschen ins Auge faßt. Da geht der Mathematiker nicht viel anders mit seinen aus Zeichen gebauten Formeln um wie der Tischler in seiner Werkstatt mit Holz und Hobel, Säge und Leim.« (Weyl 1971: 23) In der formalistischen Auffassung der Mathematik sind die Zeichen und Zeichenketten bloß noch 'Objekte', die nichts bedeuten, auf nichts mehr hinweisen außerhalb des Systems, dessen Bausteine sie sind. Sie sind Partikel eines syntaktischen Systems, die künstlich hergestellt und mechanisch bearbeitet werden gemäß der Regeln des Kalküls. Interpretation ist, wenn überhaupt, ein nachfolgender Akt.

Damit koppelt sich die Mathematik endgültig ab von einer wie auch immer gearteten externen Welt. Sie schafft sich eine eigene Sprache, die auf nichts mehr hinweist, die referenzlos ist und selbstreferentiell. Ontologischen Status haben allein noch die (typographisch fixierten) Zeichen – die Tintenstriche auf dem Papier, die Markierungen auf dem Bildschirm.[60] Sie sind für Hilbert der Garant, daß sich der Mathematiker in seiner Suche nach einem sicheren Fundament nicht in einem unendlichen Regreß verliert. Sie bilden die Wurzeln des Hilbertschen Begründungsverfahrens, sein bis ins Extrem ausgedünntes 'lebensweltliches', außermathematisches Fundament. Frege hat die Mathematik in der Logik zu verankern versucht und Brouwer in der Grunderfahrung der 'Zweiheit'. All diese Fundierungsversuche sind, so Hilberts bündige Diagnose, gescheitert (Hilbert 1925: 87). Sein eigenes Vorgehen sieht, wie bereits geschildert, anders aus. Anstatt etwas Gegebenes auf etwas angeblich Fundamentaleres zurückzuführen, auf die Logik z.B. oder auf die Mengenlehre, versucht er dessen Widerspruchsfreiheit direkt nachzuweisen, und zwar mit Mitteln, deren Unbedenklichkeit außer Frage steht, auch in den Augen der Intuitionisten (vgl. S. 47).

Doch bevor das Denken beginnt (und mit ihm die Gefahr, sich in Widersprüche zu verfangen), muß etwas da sein, mit dem man gedanklich operieren kann: 'Objekte' des Denkens. Es sind diese primären Gedankenobjekte, diese 'Gegenstände' jenseits allen Denkens und vor ihm, die für Hilbert den Charakter eines nicht weiter hintergehbaren Fundaments haben. »Als Vorbedingung für die Anwendung logischer Schlüsse und für die Betätigung logischer Operationen (muß) schon etwas in der Vorstellung gegeben (sein): gewisse außer-logische konkrete Objekte, die anschaulich als unmittelbares Erlebnis vor allem Denken da sind. Soll das logische Schließen sicher sein, so müssen sich diese Objekte vollkommen in allen Teilen überblicken lassen und ihre Aufweisung, ihre Unterscheidung, ihr Aufeinanderfolgen oder Nebeneinandergereihtsein ist mit den Objekten zugleich unmittelbar anschaulich gegeben als etwas, das sich nicht noch auf etwas anderes reduzieren läßt oder einer Reduktion bedarf.« (Hilbert 1925: 89)

Diese 'konkreten Objekte', diese Gegenstände, die jedem Denken vorgelagert und der Wahrnehmung unmittelbar gegeben sind, sind für Hilbert nun die physikalisch realisierten, die typographisch fixierten Zeichen – die Tintenstriche auf dem Papier.[61] »Am Anfang ist das Zeichen«,

60 Brouwer war einer der ersten, der den Primat der Zeichen in der formalistischen Mathematik erkannt hat. In seiner 1912 gehaltenen Antrittsvorlesung bringt er, wie bereits erwähnt, die Differenz zwischen Intuitionismus und Formalismus genau auf den Punkt: »The question where mathematical exactness does exist, is answered differently by the two sides; the intuitionist says: in the human intellect, the formalist says: on paper.« (Brouwer 1912: 125)

61 Von dieser 'Materialität', die die Zeichen bereits bei Hilbert besitzen, bis zu Herbert Simons und Allen Newells Begriff des 'physikalischen Symbolsystems' ist es dann

wie er mit herrischem Gestus bestimmt (Hilbert 1922: 18). Indem Hilbert die konkreten Zeichen an den Anfang stellt, die Tintenstriche auf dem Papier (und nicht komplexe 'Gedankendinge', deren Angemessenheit erst noch zu zeigen wäre), versucht er das mathematische Denken von allen Voraannahmen freizumachen. Die Überlegungen beziehen sich nicht mehr, wie es Frank P. Ramsey 1926 formulierte, »auf abstrakte oder unendlich komplexe Gegenstände, sondern auf Zeichen auf dem Papier, und obwohl jeder bezweifeln mag, ob eine Teilmenge einer gewissen Art von unendlicher Reihe einen ersten Gegenstand haben muß, kann niemand bezweifeln, daß, wenn = auf einer Seite auftaucht, es auf der Seite einen Ort gibt, wo es zum erstenmal auftaucht.« (Ramsey 1926: 183)

Hatte Hilbert, als er seine axiomatische Methode entwarf, Anschauung zunächst einmal gründlich aus seiner Mathematik vertrieben, so führt er sie in der zweiten Phase in gewisser Weise wieder ein, allerdings beträchtlich sklerotisiert: Anschauung ist nun reduziert auf die Wahrnehmung von Zeichen auf dem Papier. Sie ist Zeichenanschauung – Markenwahrnehmung – und nicht mehr Raumanschauung. »Der 'strenge' Formalismus verspricht«, so Thomas Volkert, »eine rein syntaktisch zu behandelnde Mathematik bereitzustellen und so alle ontologischen Probleme auszuklammern. Hierzu müssen die mathematischen Zeichen (...) ihrer Referenz beraubt werden: sie sollen nur noch bedeutungsleere Marken sein. Die in der Metamathematik zugelassene Anschauung ist ganz rudimentäre Markenwahrnehmung.« (Volkert 1986: 351)[62]

Zusammenfassend formuliert zeichnet sich der Hilbertsche Formalismus durch folgende Merkmale aus:

(1) Die Axiome haben keinen anschaulichen oder evidenten Charakter mehr, sondern sind beliebig wählbare *Hypothesen*, 'Satzungen' gewissermaßen, deren 'Wahrheit' nicht zur Debatte steht.

(2) Die mathematischen Gegenstände und ihre Beziehungen untereinander sind *rein immanent definiert*, über die Axiome, und haben keinen

---

nur noch ein kleiner gedanklicher Schritt, der allerdings durch die Erfindung des Computers beträchtlich erleichtert wurde, vgl. dazu Teil 3.

62 Daß mit Hilberts Idee, die konkreten, physikalisch realisierten Zeichen an den Anfang zu stellen, die Gefahr eines Zirkels möglicherweise gebannt war, damit gleichzeitig aber wieder eine – allerdings enorm verdünnte – Form von Anschauung in die Mathematik eingeführt wurde, vermerkt auch Abraham Fraenkel in seiner Vorlesung zur Mengenlehre: »Den Ausgangspunkt, dessen Vorhandensein glücklicherweise den Vergleich mit Münchhausen zuschanden werden läßt, bilden (...) gewisse primitive, 'unmittelbar anschauliche' Objekte und Tatsachen, wobei jedoch 'anschaulich' in unvergleichlich viel engerem Sinn verstanden wird als seitens der Intuitionisten.« (Fraenkel 1927: 158)

Bezug mehr zu einer Welt außerhalb der Mathematik. »Wir denken drei verschiedene Systeme von Dingen: die Dinge des ersten Systems nennen wir Punkte und bezeichnen sie mit A, B, C ...«, schreibt Hilbert und macht damit deutlich, daß seine Punkte Existenz nur in dem von ihm geschaffenen symbolischen Universum haben (Hilbert 1899: 2). Was 'Punkte', 'Gerade' oder 'Ebenen' sind, und was Wörter wie 'zwischen', 'kongruent' oder 'liegen auf' bedeuten, wird implizit durch die Axiome festgelegt – »wie durch Spielregeln, die sagen, wie man mit den Dingen spielen darf« (Hans Freudenthal 1957: 112).

(3) Die Axiome und die durch sie definierten Gegenstände werden im Medium einer formalen Sprache als *Zeichen und Zeichenketten* dargestellt, und es ist diese Zeichenebene, auf der die formalistische Mathematik operiert. Anschauung schrumpft auf die Wahrnehmung von Markierungen auf dem Papier.

(4) Die Bausteine dieser Sprache bestehen aus einem Grundbestand von Zeichen und aus einer beschränkten Anzahl von Vorschriften, die genau festlegen, auf welche Weise die Zeichen kombiniert und die Zeichenketten transformiert werden dürfen. Die Mathematik verwandelt sich damit in einen reinen *Kalkül*, innerhalb dessen, so die Annahme Hilberts, sich alle wahren Sätze der klassischen Mathematik durch rein syntaktische Operationen erzeugen lassen.

(5) Das Operieren mit diesen Zeichen, ihre Kombination und Transformation, ist im Prinzip ein rein *mechanischer Prozeß*. Das inhaltliche Schließen wird, wie Hilbert schreibt, »durch ein äußeres Handeln nach Regeln ersetzt« (Hilbert 1925: 95). An die Stelle eines inhaltlichen tritt ein rein formaler Wahrheitsbegriff. Wahrheit wird als Widerspruchsfreiheit definiert, und diese ist relativ zur axiomatischen Satzung.

Die Moderne bedeutet den Verzicht auf die Idee der Repräsentation. Die Hilbertsche Mathematik steht für die Moderne. Sie hat den Bruch mit dem Repräsentationsmodell endgültig vollzogen. Die Unterscheidung zwischen Zeichen und Bezeichnetem, die bis anhin unangetastet blieb, fällt in der mathematischen Moderne in sich zusammen. Was bleibt, sind die konkreten Zeichen, die, wenn überhaupt, bloß auf andere Zeichen verweisen. Als »Säkularisierung der Symbole« hat Sybille Krämer die allmähliche Lockerung der Beziehung zwischen Zeichen und Referenzgegenstand bezeichnet, die dann bei Hilbert (und erst recht bei Turing) umschlägt in reine Selbstreferentialität.

Im Hilbertschen Formalismus wird die Mathematik zu einem in sich geschlossenen System, das sich und seine Elemente selbst erzeugt und damit endgültig abgekoppelt ist von allen 'lebensweltlichen' Bezügen. »Die mathematische Wissenschaft nimmt«, wie Henri Poincaré mit kritischem Blick auf die 'neue' Mathematik formuliert, »indem sie streng wird, den Charakter des Künstlichen an, der alle Welt befremdet; sie vergißt ihren historischen Ursprung; man sieht, wie die Fragen gelöst werden können, man sieht nicht mehr, wie und warum sie gestellt wurden.« (Zit. in Mehrtens 1990: 240)[63] Die Zeichenwelten selbst sind kontingent. Sie können so aussehen oder auch anders. Was man an den Anfang stellt, welche Axiome man setzt, ist im Prinzip beliebig. Es gibt keine außersymbolischen Restriktionen mehr für die Wahl der Axiome. Als einziges Kriterium verbleibt die Forderung nach Widerspruchsfreiheit. »Das Wesen der Mathematik liegt gerade in ihrer Freiheit«, hatte Georg Cantor Anfang der 80er Jahre deklariert (zit. in Purkert/Ilgauds 1987: 112). Der moderne Mathematiker schafft die Regeln und setzt die Begriffe: »A sei eine Punktmenge ...«. Hat er aber die Eckpfeiler seines symbolischen Universums einmal gesetzt, dann bleibt er darin gefangen. Einmal erzeugt, wird das mathematische System zu einer Maschinerie, in der der Mathematiker im Prinzip nur noch Ausführungsfunktionen hat. Was ihm bleibt, ist ein »mechanisches Formeln«, wie Frege das 'logische Spiel' der modernen Mathematik unwirsch qualifizierte (Frege an Hilbert, in Frege 1976: 58).

L.E.J. Brouwer und David Hilbert haben zwei grundlegend verschiedene Auffassungen der Mathematik formuliert, und beide entwarfen zwei unterschiedliche Strategien, um Widersprüche ein für allemal auszuschließen. Beide Programme wiesen jedoch erhebliche Defizite auf, wenn auch aus verschiedenen Gründen. Während niemand daran zweifelte, daß sich mit Brouwers Mathematik die Gefahr von Widersprüchen bannen ließ, befürchteten viele, daß die intuitionistische Mathematik vom klassischen Bestand der Mathematik nur noch ein »Trümmerfeld« (Gentzen) übrig lasse. Ganz anders bei Hilbert. Während Hilberts Strategie darauf abzielte, den legitimen Gegenstandsbereich der Mathematik um das Cantorsche 'Paradies' zu erweitern, und er insofern den klassischen Bestand der Mathematik in keiner Weise gefährdete, im Gegenteil, hatte er vor allem zu belegen, daß sich mit seiner Beweistheorie die Widerspruchsfreiheit eines Systems tatsächlich nachweisen läßt. Solange ihm

63 Und weiter: »Das beweist, daß die Logik nicht genügt, daß die demonstrative Wissenschaft nicht die ganze Wissenschaft ist, und daß die Intuition ihre Rolle als Ergänzung, ich möchte sagen als Gegengewicht oder als Gegengift, beibehalten muß.«

dies nicht gelang, konnte man mit guten Gründen an der Leistungsfähigkeit seiner Strategie zweifeln.

Letztlich ist es weder Hilbert noch Brouwer gelungen, die Zweifel an ihren Programmen endgültig auszuräumen. Dennoch flachte die Auseinandersetzung Ende der 20er Jahre ab. Die Grundlagendebatte wurde beigelegt, bevor sich eines der beiden Programme nachweislich als das 'Bessere' erwiesen hatte. Die formalistische Auffassung Hilberts setzte sich durch, und der Intuitionismus Brouwers wurde zu einer Randerscheinung in der Geschichte der Mathematik (vgl. Kap. 5). Daran konnten auch die verschiedenen limitativen Beweise nichts ändern, die Anfang der 30er Jahre praktisch Schlag auf Schlag demonstrierten, daß Hilberts beweistheoretisches Programm nicht durchführbar war. Obschon die Begrenztheit des Hilbertprogramms damit deutlich bewiesen war und die Mathematik im Prinzip ungesicherter war denn je, kam es nicht zu einer Wiederbelebung der grundlagentheoretischen Debatte. Der Formalismus hatte sich durchgesetzt, als Arbeitsphilosophie des 'working mathematician' gewissermaßen, unbeschadet seiner nicht eingelösten Versprechen. Als Alan Turing Mitte der 30er Jahre über den Algorithmus-Begriff nachzudenken begann, war die formalistische Auffassung der Mathematik bereits fest etabliert.[64]

64 Wer bis jetzt probiert hat und zu keiner Lösung gelangt ist, der soll das Resultat der MIU-Frage verraten werden: MU ist nicht ableitbar. Mit Probieren findet man das allerdings nicht heraus, nur mit Studieren: Regel 1 und 2 sind Extensionsregeln, Regel 3 und 4 Reduktionsregeln. Jeder Beweis im MIU-System kann so 'normalisiert' werden, daß zu Beginn nur Anwendungen der Extensionsregeln stehen (in beliebiger Reihenfolge) und am Ende Anwendungen der Regel 3, gefolgt von Anwendungen der Regel 4. Damit MU ableitbar ist, muß am Schluß folglich eine Kette stehen, die ausschließlich aus ungeraden U's besteht. Dazu braucht es Regel 3, denn mit R1 und R2 allein – ohne Anwendung von R3 – läßt sich niemals eine ungerade Zahl an U's erzeugen. Um R3 anzuwenden, braucht es eine Kette, die aus drei I's oder einem Vielfachen davon besteht. Eine solche Kette ist jedoch niemals erzeugbar: R1 und R 4 verändern nichts an der Anzahl der I's; R 2 erzeugt immer nur eine gerade Anzahl von I's; und R 3 selbst erzeugt nur ein Vielfaches von 3, wenn als input schon ein Vielfaches von 3 vorlag – und genau das suchen wir ja, um R 3 überhaupt anzuwenden.

Kapitel 2

# Papiermaschinen

## *Das Maschinenmodell Alan M. Turings*

Jedenfalls will das Gerücht nicht verstummen, man könne ihn, oder sein Simulacrum, zuweilen, an feuchten Oktobertagen besonders, in der Umgebung von Cambridge, auf abgemähten Stoppelfeldern, unberechenbar Haken schlagend, im Nebel querfeldein laufen sehen.

*Hans Magnus Enzensberger*[1]

A man provided with paper, pencil, and rubber, and subject to strict discipline, is in effect a universal machine. *Alan M. Turing*[2]

David Hilbert hatte an sein beweistheoretisches Programm drei Erwartungen geknüpft. Er glaubte, daß sich die (formalisierte) Mathematik als widerspruchsfrei erweisen würde, und er nahm an, daß sie vollständig und entscheidbar sei. Ende der 20er Jahre, als sich der Formalismus endgültig zu etablieren begann, war es allerdings noch nicht so weit. Die Frage, ob die Mathematik widerspruchsfrei, entscheidbar und vollständig sei (und ob man ihr das auch nachweisen könne), war noch nicht beantwortet. Einige Jahre später war die Antwort dann gefunden: Kurt Gödel hatte 1931 die Unvollständigkeit der elementaren Zahlentheorie und damit der gesamten formalisierten Mathematik bewiesen. Darüber hinaus gelang es ihm nachzuweisen, daß die Widerspruchsfreiheit der elementaren Zahlentheorie in ihr selbst nicht hergeleitet werden kann. Und schließlich bewiesen Alonzo Church und Alan Turing 1936, daß es kein allgemeines Verfahren gibt, um für jede gegebene elementare Formel (des Prädikatenkalküls 1. Ordnung) zu entscheiden, ob sie gültig ist oder nicht. Damit war das Hilbertprogramm endgültig widerlegt.

Einige Mathematiker mochten das Scheitern des Hilbertprogramms mit Erleichterung zur Kenntnis genommen haben. Denn ein Erfolg hätte letztlich bedeutet, daß die Mathematik grundsätzlich mechanisierbar ist: Wäre die kalkülisierte Mathematik tatsächlich widerspruchsfrei, vollständig und entscheidbar, dann ließe sich im Prinzip auch eine Maschine konstruieren, die automatisch alle, auch bislang unentdeckte Sätze der

---

1 Enzensberger 1975.
2 Turing 1948: 9.

Mathematik zu erzeugen imstande wäre sowie für jede beliebige Formel entscheiden könnte, ob diese ableitbar ist oder nicht. Was viele Mathematiker damals vermuteten, ohne es genau begründen zu können, und was sich äußerte in Metaphern, die dem zeitgenössischen Maschinendiskurs entliehen waren, die begriffliche Übereinstimmung nämlich von Formalisierung und Mechanisierung, das hat Alan Turing etwas später mit seiner berühmten These auf den Punkt gebracht: Jede Operation im Rahmen eines formalen Systems ist tatsächlich simulierbar auf einer Maschine. Formalisierung und Mechanisierung sind bedeutungsäquivalente Begriffe.

Dennoch erwiesen sich die Befürchtungen, die die Mathematiker damals hegten, als unbegründet. Die Mathematik war zwar in einem gewissen Sinn tatsächlich zu einem »Formelspiel« (Weyl) geworden, zumindest hatte sich die formalistische Auffassung der Mathematik Ende der 20er Jahre als handlungsleitendes Modell durchgesetzt, gleichzeitig aber deckten die verschiedenen limitativen Theoreme auch die Grenzen formalisierter Systeme auf. Was formalisierbar ist, das ist zwar, wie Turing 1936 plausibel machte, auch mechanisierbar, aber nicht alles, was inhaltlich einsehbar ist, läßt sich auch in ein formales System überführen. Bereits 1926 hatte der Schweizer Mathematiker Paul Finsler (1894 – 1970) zu beweisen versucht, allerdings nur »rein gedanklich«, daß es in jedem formalen System Sätze gibt, die inhaltlich gesehen wahr, formal aber nicht ableitbar sind (Finsler 1926). In Formalistenkreisen wurde Finslers Beweis nicht eben freundlich kommentiert. Hilbert und Bernays erwähnen ihn zwar in ihren *Grundlagen der Mathematik*, aber ihr Ton ist eher herablassend (1939: 281), und Gödel selbst qualifizierte Finslers Beweis ohne Umschweife als »obvious nonsense« (zit. in Dawson 1988: 83). Ganz anderer Meinung war dagegen der Schweizer Mathematiker L. Locher, der sich von Finslers Arbeit – ganz im Stile der Zeit – eine »gesundende (!) Wirkung« versprach: »Mag man noch so sehr das 'inhaltliche' Denken belächeln, gerade die diesbezüglichen Finslerschen Abhandlungen können die heute mancherorts als unmodern taxierte Bewußtseinstatsache wieder beleuchten, daß das Mathematische eben nur in denkend erlebten Ideen erfaßt werden kann.« (Locher 1937/38: 207)

Was Finsler inhaltlich zu begründen suchte, das hat Kurt Gödel (1906 – 1978) fünf Jahre später *formal* bewiesen: In jedem widerspruchsfreien formalen System T, in welchem sich die natürlichen Zahlen und ihre Grundoperationen (Addition, Multiplikation, Gleichheit von Elementen) ausdrücken lassen, gibt es Sätze, die inhaltlich wahr, aber in T nicht ableitbar sind. Formale Beweisbarkeit ist folglich ein schwächerer Begriff als Wahrheit; ein formalisiertes Axiomensystem kann den Bereich der arithmetischen Wahrheiten nie vollständig ausschöpfen. Das war der erste Beweis, der sog. *Unvollständigkeitsbeweis*. In einem zweiten Schritt bewies Gödel, daß die Widerspruchsfreiheit eines formalen Systems T nicht mit den in T selbst formalisierten Mitteln bewiesen werden kann. Für einen solchen Beweis braucht es ein 'stärkeres' System T', dessen Widerspruchsfreiheit jedoch wiederum nicht in ihm selbst hergeleitetet werden kann (Gödel 1931a).

Kurt Gödel hat seinen Unvollständigkeitsbeweis 1930 an einer Tagung in Königsberg angekündigt. Die Diskussion wurde transkribiert und Auszüge davon erschienen in der von Hans Reichenbach und Rudolf Carnap herausgegebenen und dem Wiener Kreis nahestehenden Zeitschrift *Erkenntnis*. Dazu gehörte auch die Ankündigung Gödels zusammen mit einer erläuternden Nachschrift, um die ihn die Herausgeber gebeten hatten. Die folgende Passage stammt aus dieser Nachschrift.[3] Ich zitiere sie, um die Grundidee der beiden Beweise in Gödels eigenen Worten wiederzugeben:

»Es handelt sich in dieser Arbeit um Probleme von zweierlei Art, nämlich 1. um die Frage der Vollständigkeit (Entscheidungsdefinitheit) formaler Systeme der Mathematik, 2. um die Frage der Widerspruchsfreiheitsbeweise für solche Systeme. Ein formales System heißt *vollständig*, wenn jeder in seinen Symbolen ausdrückbare Satz aus den Axiomen formal entscheidbar ist, d.h. wenn für jeden solchen Satz A eine nach den Regeln des Logikkalküls verlaufende endliche Schlußkette existiert, die mit irgendwelchen Axiomen beginnt und mit dem Satz A oder dem Satz non-A endet. Ein System S heißt vollständig hinsichtlich einer gewissen Klasse von Sätzen R, wenn wenigstens jeder Satz von R aus den Axiomen von S entscheidbar ist. Was in der obigen Arbeit gezeigt wird, ist, daß es kein System mit endlich vielen Axiomen gibt, welches auch nur hinsichtlich der arithmetischen Sätze vollständig wäre (...) Bezüglich der Resultate über die *Widerspruchsfreiheitsbeweise* ist zunächst zu beachten, daß es sich hier um Widerspruchsfreiheit in formalem (Hilbertschen) Sinn handelt, d.h. die Widerspruchsfreiheit wird als rein kombinatorische Eigenschaft gewisser Zeichensysteme und der für sie geltenden 'Spielregeln' aufgefaßt (...) Was gezeigt wird, ist nun das folgende: Für alle formalen Systeme, für welche oben die Existenz unentscheidbarer arithmetischer Sätze behauptet wurde, gehört insbesondere die Aussage der Widerspruchsfreiheit des betreffenden Systems zu den in diesem System unentscheidbaren Sätzen. D.h. ein Widerspruchsfreiheitsbeweis für eines dieser Systeme S kann nur mit Hilfe von Schlußweisen geführt werden, die in S selbst nicht formalisiert sind. Für ein System, in dem alle finiten (d.h. intuitionistisch einwandfreien) Beweisformen formalisiert sind, wäre

3 Während Gödel an der Tagung selbst nur seinen Unvollständigkeitsbeweis angekündigt hatte, erläutert er in seinem Nachtrag auch seinen zweiten Beweis. Die mathematische Fassung der beiden Beweise findet sich in Gödel 1931a.

also ein finiter Widerspruchsfreiheitsbeweis, wie ihn die Formalisten suchen, überhaupt unmöglich.« (Gödel 1931b: 202; 204)4

Mit seinem Unvollständigkeitssatz hatte Gödel bewiesen, daß sich nicht alle inhaltliche Mathematik in ein formales System überführen läßt, und er hatte gleichzeitig gezeigt, daß man für den Beweis der Widerspruchsfreiheit eines formalen Systems T Beweismittel braucht, deren Unbedenklichkeit erst zu prüfen wäre – durch einen Widerspruchsfreiheitsbeweis des 'höheren' Systems T', in dem sie formuliert sind, doch dazu wäre man wiederum auf Mittel angewiesen, deren Unbedenklichkeit erst noch zu testen wäre u.s.w. Es ist, wie es der norwegische Mathematiker Thoralf Skolem (1887 – 1963) formulierte, »as if we should hang up the ground floor of a building to the first floor, this again to the second, etc.« (zit. in Thiel 1972: 124).

Mit diesen beiden Beweisen war die Unerfüllbarkeit des Hilbertschen Programms erwiesen – und damit auch die Unmöglichkeit, eine Maschine zu konstruieren, der man von nun an die Erzeugung mathematischer Sätze hätte überlassen können. Gödel hat mit seinem Doppelbeweis auf die immanenten Grenzen der formalistischen Mathematik aufmerksam gemacht, und er hat sich dabei der Methoden jener Mathematik bedient, deren Begrenztheit er in seinem Beweis nachwies. Daß Gödels Beweis ein rein formaler war, mag mit ein Grund dafür gewesen sein, weshalb er trotz seines Ergebnisses bei den Formalisten auf mehr Resonanz, auch auf mehr positive Resonanz gestoßen ist als bei den inhaltlich orientierten Mathematikern.[5]

Hilbert reagierte gelassen auf den Nachweis, den Gödel erbracht hatte. Obschon mit den beiden Gödelschen Sätzen bewiesen war, daß sich das

4 Zur Konstruktion von Gödels Doppelbeweis, auf den ich hier nicht näher einzugehen brauche, vgl. die allgemein verständliche und gleichzeitig genaue Einführung von Nagel/Newman 1958 sowie um einiges technischer Stegmüller 1959.

5 Zur Rezeptionsgeschichte von Gödels Beweis vgl. auch Kap. 3.2. Gödels Unvollständigkeitsbeweis hat trotz der Anforderungen, die er stellt, auch außerhalb der Mathematik Karriere gemacht. Während er in den Augen der einen die unverrückbare Überlegenheit des menschlichen Geistes beweist (vgl. für diese Position schon sehr früh Nagel/Newman 1958, insb. Kap. 8, sowie Lucas 1961), belegt er aus der Sicht der anderen genau das Gegenteil, nämlich die prinzipielle Ununterscheidbarkeit von Mensch und Maschine in kognitiver Hinsicht; vgl. für diese (Minderheits-)Position Putnam 1975b und sehr ausführlich Webb 1980. Die Kontroverse um die außermathematischen Implikationen des Gödelschen Beweises hat eine lange und nicht enden wollende Geschichte. Als ein relativ rezentes Beispiel vgl. den Aufsatz von Wandschneider 1990 sowie die Repliken darauf. Ich komme in Kapitel 8 noch einmal darauf zurück.

formalistische Programm nicht durchführen ließ (oder nur unter gelockerten Bedingungen), gab er sich weiterhin optimistisch. Er sei zwar zunächst »somewhat angry and frustrated« gewesen, berichtet seine Biographin Constance Reid (Reid 1989: 198), aber schon drei Jahre später hält er im Vorwort zu seinem zusammen mit Paul Bernays verfaßten ersten Band der *Grundlagen der Mathematik* entschlossen fest, »die zeitweilig aufgekommene Meinung, aus gewissen neueren Ergebnissen von Gödel folge die Undurchführbarkeit meiner Beweistheorie, (hat sich) als irrtümlich erwiesen« (Hilbert/Bernays 1934). Die Behauptung, daß sein Programm durch Gödels Resultate nicht wesentlich gefährdet sei, stand allerdings auf etwas unsicheren Füßen. Gerhard Gentzen (1909 – 1945), der damalige Assistent von Hilbert, bewies zwar zwei Jahre später die Widerspruchsfreiheit der Arithmetik, aber dies gelang ihm nur, indem er den ursprünglichen Forderungskatalog um einiges entschärfte. Gentzens Beweis der Widerspruchsfreiheit der Arithmetik bedient sich der transfiniten Induktion und läßt damit – entgegen der Anforderungen, die Hilbert ursprünglich aufgestellt hatte – auch nicht-finitistische Beweismethoden zu.

Wie man Gödels Resultate und den Beweis von Gentzen interpretiert, hängt davon ab, wie eng man sich an Hilberts ursprüngliche Formulierung hält. Gentzen hatte gezeigt, daß ein absoluter Widerspruchsfreiheitsbeweis für die Arithmetik möglich ist, allerdings nur unter der Bedingung, daß man auch nicht-finitistische Methoden zuläßt. Damit hat sich Hilberts Überzeugung, daß die Arithmetik widerspruchsfrei ist und man ihr das auch nachweisen könne, in gewissem Sinne bewahrheitet, freilich nur unter beträchtlich liberalisierten Bedingungen. Hilbert jedenfalls hat den (von ihm angeregten) Beweis Gentzens als klare Bestätigung seiner Theorie interpretiert und sein methodisches Programm danach ausgerichtet. Gentzens Beweis habe ein für allemal gezeigt, so Hilbert und Bernays im zweiten Band ihrer *Grundlagen der Mathematik*, der 1939 erschien, vier Jahre vor Hilberts Tod, daß das angebliche Scheitern der Beweistheorie bloß ein »zeitweiliges Fiasko« gewesen sei. Diese Einschätzung habe an einer »Überspannung der methodischen Anforderung« gelegen – und damit war die Beschränkung auf finitistische Methoden gemeint, die Hilbert ursprünglich gefordert hatte (Hilbert/Bernays 1939).[6] Gentzen selbst war in seiner Einschätzung ambivalent. In einem

6 Gödel schätzte die Implikationen seiner beiden Beweise für Hilberts Beweistheorie übrigens ähnlich ein wie dieser selbst. Mit Hilbert hatte er allerdings nie persönlichen Kontakt. Die Korrespondenz verlief ausschließlich über Paul Bernays

Aufsatz zur gegenwärtigen mathematischen Grundlagendiskussion, der 1938 in der zwei Jahre früher gegründeten Zeitschrift *Deutsche Mathematik* erschien, wertet er Gödels Unvollständigkeitsbeweis zwar als ein »nicht etwa beunruhigendes Ergebnis«, um aber gleichzeitig festzustellen, daß bis heute eine »endgültige Klärung dieser Angelegenheit (der Grundlagenproblematik, B.H.) nicht erreicht worden« sei (Gentzen 1938: 260; 255).[7]

Gödels Resultate haben jedoch noch eine andere Implikation. Mit dem Nachweis, daß es immer wahre Sätze gibt, die aus einem formalen System nicht abgeleitet werden können, war die Hoffnung auf die Konstruierbarkeit einer universalen mathematischen Maschine ein für allemal widerlegt. Was Gödel mit seinem Unvollständigkeitssatz gezeigt hatte, war die Unmöglichkeit, eine Maschine zu konstruieren, die *alle* wahren Sätze der Mathematik zu erzeugen imstande ist (Unvollständigkeitssatz). Und die Ergebnisse von Church und Turing fünf Jahre später bewiesen, daß es auch keine Maschine geben kann, die für *jede* beliebige Formel entscheiden kann, ob sie allgemeingültig ist oder nicht (Unentscheidbarkeitssatz für den Prädikatenkalkül 1. Ordnung). Damit waren die prinzipiellen Grenzen des Hilbertschen Programms fixiert. Ende der 30er Jahre war erwiesen, daß »(a) keine universale Maschine der Wahrheits*findung* gebaut werden kann, die alle wahren Sätze eines formalisierten Systems mechanisch herzuleiten gestattet. Und daß (b) keine universale Maschine der Wahrheits*überprüfung* konstruierbar ist, die von jedem in der Sprache eines formalisierten Systems gegebenen Ausdruck mechanisch entscheiden kann, ob dieser Ausdruck rein logisch gültig ist.« (Krämer 1990: 129)

Damit habe ich allerdings vorgegriffen. 1931, als Gödel seine Resultate publizierte und damit zwei wesentliche Stützen des formalistischen Programms ins Wanken brachte, gab es immerhin noch eine Frage, die vielleicht eine positive Antwort finden würde, die Frage nämlich, ob die Mathematik entscheidbar ist.

---

(Reid 1989: 217f.). Einen Überblick über die Erfolge und Mißerfolge der Beweistheorie, so wie sie sich einem Befürworter Hilberts darstellen möchten, geben Bernays 1935 sowie Gentzen 1938.

7 Zum Versuch eine 'deutsche' Mathematik zu etablieren, wozu auch die kurz nach der nationalsozialistischen Machtergreifung ins Leben gerufene Zeitschrift gleichen Namens gehörte; vgl. u.a. Mehrtens 1985 sowie Lindner 1980.

## 1. Mathematik und Maschinerie

> Immer größer wird die Zahl derjenigen, welche glauben, daß das eigentlich Mathematische darin und nur darin bestehe, daß man aus einem Axiomensystem mit Hilfe gewisser formalisiert angebbarer Regeln weitere Aussagen formal 'herleiten' könne. Konsequent weitergedacht, muß man dann auch zugeben, daß Mathematik in diesem Sinne sich durch Maschinen verwirklichen lasse.
>
> *L. Locher*[8]

1936 veröffentlichte der junge englische Mathematiker Alan M. Turing (1912 – 1954) einen Aufsatz mit dem Titel *On Computable Numbers, With an application to the Entscheidungsproblem* (Turing 1936).[9] Mit diesem Aufsatz hat Turing nicht nur ein entscheidendes Problem der mathematischen Grundlagenforschung gelöst, die Implikationen seiner Argumentation reichen weit über die Mathematik hinaus. Turing hat damals (ohne es freilich zu wissen), die Grundlage gelegt für Disziplinen, die erst Jahre später entstanden sind, insbesondere für die Theoretische Informatik und für die Cognitive Science. Turings Aufsatz hat aber auch Implikationen für die Soziologie. Mit seiner Arbeit hat Turing ein begriffliches Instrumentarium bereitgestellt, das sich nutzbar machen läßt für eine neue und präzisere Bestimmung der Differenz zwischen regel- und sinnhaftem Handeln. Davon handelt der 3. Teil dieser Arbeit.

In den letzten Jahren ist Turing auch außerhalb der Mathematik zu einer Kultfigur avanciert, zumal in jenen schöngeistigen Kreisen, in denen technisches Nicht-Wissen noch immer einen gewissen Distinktionseffekt garantiert. Sein Leben verleiht dem profanen Interesse am Computer die gebotene intellektuelle Weihe. Turing war ein Außenseiter – in der Mathematik, im Leben und unter den Computererfindern seiner Zeit. Er war Mathematiker, passionierter Marathonläufer und reichlich exzentrisch. Er war homosexuell und während des 2. Weltkriegs angestellt vom Britischen Geheimdienst, für den er in Bletchley Park die deutsche ENIGMA knackte. Er hat ein eigenes Computerdesign entwickelt und einen bahnbrechenden Aufsatz zur Künstlichen Intelligenz verfaßt, bevor es diese dem Namen nach überhaupt gab. Er war, so sein Kollege Peter Hilton, »obviously a genius, but an approachable, friendly

8 Locher 1937/38: 206.

9 Die meisten Arbeiten von Turing sind seit einiger Zeit auch auf deutsch in dem von Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler herausgebenen Band *Intelligence Service* zugänglich (Turing 1987). Ich beziehe mich im folgenden aber auf die englischen Fassungen.

genius«, und er starb schließlich einen mysteriösen Schneewittchentod – er biß in einen Apfel, der mit Zyankali vergiftet war.[10]

Turing war knapp 24 Jahre alt und noch Student, als er die Antwort auf ein Problem fand, von dem Hilbert zwei Jahre früher noch geschrieben hatte, daß man von seiner Lösung »weit entfernt« sei (Hilbert/Bernays 1934: 132). Turings Aufsatz beschäftigte sich mit dem berühmten Entscheidungsproblem, und als *Entscheidungsproblem* wurde die Frage bezeichnet, ob es ein effektives Verfahren, einen Algorithmus gibt, mit dem man für jede beliebige Formel nach endlich vielen Schritten entscheiden kann, ob sie ableitbar ist oder nicht (vgl. S. 53). Die Problemstellung stammte von Hilbert selbst. In seinem 1917 gehaltenen Vortrag *Axiomatisches Denken*, der die zweite Phase seiner grundlagentheoretischen Überlegungen einleitete, hatte Hilbert das Entscheidungsproblem in den Kontext einer Reihe von erkenntnistheoretischen Problemen gestellt. Die Frage nach der Widerspruchsfreiheit sei nicht »eine für sich alleinstehende«, sondern gehöre »einem großen Bereiche schwierigster erkenntnistheoretischer Fragen von spezifisch mathematischer Färbung« an. Dazu zählt Hilbert u.a. das »Problem der prinzipiellen Lösbarkeit einer jeden mathematischen Frage«, die »Frage nach dem Verhältnis von Inhaltlichkeit und Formalismus in Mathematik und Logik« und das »Problem der Entscheidbarkeit einer mathematischen Frage durch eine endliche Anzahl von Operationen«. Es war dieses Problem, das in seinen Augen das »Wesen des mathematischen Denkens« am tiefsten berührt (Hilbert 1918: 8). Nicht ohne Grund: Denn hätte das Entscheidungsproblem eine positive Lösung gehabt, existierte, anders formuliert, tatsächlich ein Verfahren, »an Hand dessen wir von einer beliebig vorgelegten Formel entscheiden können, ob sie ableitbar ist oder nicht« (Hilbert/Bernays 1939: 416), dann ließe sich im Prinzip für jede mathematische Vermutung mit Sicherheit entscheiden, ob sie beweisbar ist oder nicht - und die Mathematik wäre damit, wie es Hilberts

10 Turings Leben und Persönlichkeit sind schon auf vielerlei Weise beschrieben worden. Hans Magnus Enzensberger hat ihm ein Gedicht gewidmet, Hugh Whitemore hat über ihn ein Theaterstück verfaßt, und auch Rolf Hochhuth hat sich seiner angenommen (in einer nicht eben überzeugenden erzählerischen Nachempfindung von Turings Leben). Die erste biographische Notiz stammt von seinem Lehrer M.H.A. Newman (Newman 1955). Fünf Jahre nach seinem Tod hat seine Mutter Sara Turing eine biographische Skizze über ihn veröffentlicht zusammen mit einigen bislang unveröffentlichten Dokumenten (Sara Turing 1959). Die beste und umfassendste Biographie stammt von Andrew Hodges. Sie ist 1989 auch auf deutsch erschienen (Hodges 1989).

Schüler Heinrich Behmann 1922 etwas pathetisch und nicht ohne Übertreibung formulierte, in eine »ungeheure Trivialität« verwandelt worden (Behmann 1922: 116).

Die Unentscheidbarkeit sei sogar die »Conditio sine qua non dafür«, schrieb John von Neumann 1927 (auf ihn komme ich im Zusammenhang mit der Erfindung der 'realen' Maschine noch ausführlich zu sprechen), »daß es überhaupt einen Sinn habe, mit den heutigen heuristischen Methoden Mathematik zu treiben. An dem Tage, an dem die Unentscheidbarkeit aufhörte, würde auch die Mathematik im heutigen Sinne aufhören zu existieren; an ihre Stelle würde eine absolut mechanische Vorschrift treten, mit deren Hilfe jedermann von jeder gegebenen Aussage entscheiden könnte, ob diese bewiesen werden kann oder nicht.« (Von Neumann 1927: 266) Ähnlich, nur um einiges ungehaltener, argumentierte auch der englische Mathematiker G.H. Hardy. »Suppose, for example, that we could find a finite system of rules which enabled us to say whether any given formula was demonstrable or not. This system would embody a theorem of metamathematics. There is of course no such theorem, and this is very fortunate, since if there were we should have a mechanical set of rules for the solution of all mathematical problems, and our activities as mathematicians would come to an end.« (Hardy 1929: 16)

Das Problem, mit dem sich Turing beschäftigte, wurde also – wie die formalistische Mathematik überhaupt – in Verbindung gebracht mit etwas *Mechanischem*. Es stand als Symbol für den maschinenmäßigen Charakter der neuen modernen Mathematik. Von Neumann sprach von einer »mechanischen Vorschrift«, Hardy (etwas mißverständlich) von einer »mechanical set of rules«, und eine ähnliche Formulierung gebrauchte auch M.H.A. Newman, der Lehrer von Alan Turing, der in seiner Vorlesung von einem »mechanischen Verfahren« sprach. Diese Formulierung sei es auch gewesen, so Turings Biograph Andrew Hodges, die Turing auf die Idee gebracht habe, ganz konkret an Maschinen zu denken (Hodges 1989: 111) – wenn auch zuerst an *menschliche* Maschinen.

Die Lösung des Entscheidungsproblems hätte also in der Angabe eines Entscheidungsalgorithmus bestanden – oder aber in dem Beweis, daß es ein solches allgemeines Verfahren nicht geben kann. Aber was war mit dem Begriff *Verfahren* genau gemeint? Diese Frage war der springende Punkt. Denn um das Entscheidungsproblem zu lösen, mußte zunächst einmal geklärt werden, was unter dem Begriff 'Verfahren' – oder 'Algorithmus' – in einem mathematisch präzisen Sinn zu verstehen war, und genau dies hat Turing mit seiner Arbeit getan. Allgemeine Verfahren, um Probleme zu lösen, hatte man in der Mathematik schon immer verwendet, man denke z.B. an den Algorithmus zur Division natürlicher Zahlen oder, ein beliebtes Beispiel, an den Euklidschen Algorithmus zur Berechnung des größten gemeinsamen Teilers. Auf dieser intuitiven Ebene ist es auch nicht weiter schwierig zu definieren, was ein Algorithmus ist: Ein Algorithmus ist ein Verfahren, das in einer *endlichen* Anzahl von *elementaren* Operationsschritten, deren Abfolge im voraus in einer *endlich* langen Beschreibung *eindeutig* festgelegt ist, die Lösung eines (mathematischen) Problems erlaubt. Oder in der knappen Formulierung von Stephen C. Kleene, einem Logiker, der an der Grundlagendiskussion der 30er Jahre selbst maßgeblich beteiligt war: »An algorithm is a *finitely* described procedure, sufficient to guide us to the answer to any one of *infinitely* many questions, by *finitely* many steps in the case of each question.« (Kleene 1988: 19)[11]

In dieser Definition sind alle Eigenschaften bereits aufgeführt, die gemeinhin als konstitutive Merkmale des *intuitiven* Algorithmusbegriffs gelten.[12]

(1) *Eindeutigkeit*: Die Reihenfolge der Operationsschritte ist im voraus eindeutig festgelegt. 'Eindeutigkeit' ist gleichzeitig auch das Unterscheidungsmerkmal von Algorithmen und Kalkülen. Im Gegensatz zum Algorithmus ist bei einem Kalkül nicht festgelegt, in welcher Reihenfolge die Regeln (bzw. Anweisungen) anzuwenden sind. Beim Algorithmus hingegen ist die Reihenfolge der Operationsschritte im vornherein genau spezifiziert. Es gibt keinen Entscheidungsspielraum mehr.[13]

(2) *Endlichkeit*: Da die Schritte des algorithmischen Prozesses im voraus festgelegt sind, kann die algorithmische Vorschrift nur eine endliche Zahl von Anweisungen enthalten. Dasselbe gilt auch für die Zeit, die zur Ausführung eines einzelnen Operationsschrittes benötigt wird: Eine Anweisung muß nach einem bestimmten Zeitintervall beendet sein. Hingegen wird nicht gefordert, daß das algorithmische Verfahren irgendwann einmal abbrechen muß. Terminierung ist ein fakultatives Kri-

11 Ähnlich auch Hans Hermes: »Ein Algorithmus ist ein generelles Verfahren, mit dem man die Antwort auf jede einschlägige Frage durch eine simple Rechnung nach einer vorgeschriebenen Methode erhält.« (Hermes 1978: 1)

12 Vgl. zum folgenden Hermes 1978: Kap. 1; Knuth 1973: Kap. 1.1.; Krämer 1988: 159ff.

13 Deterministische Algorithmen sind der Normalfall. Es gibt allerdings auch nichtdeterministische Algorithmen, bei denen an gewissen Stellen mehrere Fortsetzungsmöglichkeiten bestehen. Zum Kalkülbegriff vgl. auch S. 54.

terium. Mit anderen Worten: Ein Algorithmus braucht nicht unbedingt nach einer endlichen Anzahl von Operationsschritten zu einem Ende zu kommen. Es gibt auch Algorithmen, die nie abbrechen, so z.B. der Algorithmus zur Berechnung der Quadratwurzel als Dezimalbruch aus einer gegebenen natürlichen Zahl.[14]

(3) *Determiniertheit*: Da alle Operationsschritte im voraus eindeutig und bis ins Detail festgelegt sind, braucht es bei der Ausführung eines Algorithmus keine persönliche Eigenleistung mehr. Der Ausführende eines Algorithmus muß, wie es Hans Hermes formuliert, »sklavisch nach den ihm gegebenen Vorschriften arbeiten, die alles bis ins kleinste regeln« (Hermes 1978: 1). Dies erfordert eine Zerlegung des Problemlösungsverfahrens in ganz elementare Operationsschritte, deren Ausführung so einfach ist, daß sogar, wie Turing später zeigte, eine Maschine dazu in der Lage ist. Ein algorithmischer Prozeß ist im Prinzip problemlos reproduzierbar. Es spielt keine Rolle, wer ihn ausführt.

(4) *Unterscheidbarkeit*: Bei jedem algorithmischen Prozeß wird eine bestimmte Konfiguration von Gegenständen in eine andere umgewandelt. Was diese Gegenstände sind, welche physikalische Form sie haben, spielt im Prinzip keine Rolle. Es können Kügelchen sein wie beim Abakus, elektrische Impulse oder Zeichenfolgen auf dem Papier. Wesentlich ist nur, daß sich die Objekte der algorithmischen Operation, die Kügelchen oder die Striche auf dem Papier, eindeutig voneinander unterscheiden lassen.

(5) *Allgemeinheit*: Algorithmische Verfahren beziehen sich immer auf Klassen von Problemen, nicht auf ein Einzelproblem. Hat man die Technik der Addition einmal gelernt, dann läßt sie sich problemlos auf einen potentiell unbegrenzten Wertebereich anwenden.

Im Zusammenhang mit seiner Diskussion des Algorithmusbegriffs unterscheidet Stephen Kleene zwischen zwei Typen von mathematischen Fragen und macht an ihnen den Unterschied (aber auch die begriffliche Nähe) von Entscheidbarkeit und Berechenbarkeit deutlich (Kleene 1988).

(1) Fragen, die er *»yes-or-no questions«* nennt. Dazu gehört z.B. die Frage, ob *n* eine Primzahl ist, oder, allgemeiner formuliert, ob ein bestimmtes Prädikat (z.B. die Eigenschaft, eine Primzahl zu sein) auf ein mathematisches Objekt (z.B. eine gegebene natürliche Zahl *n*) zutrifft.

---

14 In diesem Punkt besteht unter den Autoren allerdings keine Einigkeit. Für Donald E. Knuth z.B. ist Terminierung ein wesentliches Definitionsmerkmal (Knuth 1973: 4), andere dagegen – wie etwa Hans Hermes – fordern in ihren Definitionen nicht, daß der algorithmische Prozeß immer zu einem Ende kommt (vgl. Hermes 1978: 2f.).

(2) »*What-questions*«: Das sind Fragen, bei denen nach einem bestimmten mathematischen Objekt – z.B. nach dem Funktionswert einer Funktion $\phi$ mit dem Argumenten $x$, $y$ – gesucht wird.

Existiert ein Algorithmus für eine Frage vom 'ja/nein'-Typus, so bezeichnet man diese als *entscheidbar*. Den Algorithmus selbst nennt man ein *Entscheidungsverfahren*. Einer Frage vom 'Was'-Typus liegt in der Regel das Problem der Bestimmung des Wertes einer gegebenen mathematischen Funktion zugrunde. Falls es einen Algorithmus gibt, der für jedes vorgegebene Argument den Wert dieser Funktion berechnet, so bezeichnet man die entsprechende Funktion als *berechenbar*. Der Algorithmus selbst ist ein *Berechnungsverfahren*. Fragen der Entscheidbarkeit lassen sich immer in solche der Berechenbarkeit umformulieren (und umgekehrt).

Hat man für eine spezifische Klasse von Problemen einen Algorithmus gelernt, so hat man damit ein Verfahren zur Hand, mit dem sich jede Einzelfrage im Prinzip rein mechanisch beantworten läßt. Die Addition z.B. ist eine Technik, die man, ist sie einmal eingeübt, auf alle möglichen Zahlwerte anwenden kann. Wer einen Algorithmus kennt, verfügt, allgemeiner formuliert, über eine Methode »for answering any one of a given infinite class of questions (...) Such a method is given by a set of rules or instructions, describing a procedure that works as follows. After the procedure has been described, if we select *any* question from the class (z.B.: 'Ist 3177 eine Primzahl?' Oder: 'Was ist der Funktionswert der Funktion $\phi$ $(x,y)$ für $x=7$ und $y=398567$?', B.H.), the procedure will then tell us how to perform successive steps, so that after a finite number of them we will have the answer to the question selected. In particular, immediately after selecting the question from the class, the rules of instructions will tell us what step to perform first, unless the answer to the question selected is immediate. After our performing any step to which the procedure has led us, the rules or instructions will either enable us to recognize that now we have the answer before us and to read it off, or else that we do not yet have the answer before us, in which case they will tell us what step to perform next. In performing the steps, we simply follow the instructions like robots; no ingenuity or mathematical invention is required of us.« (Kleene 1988: 18)

Die mathematisch interessante Frage ist nun die, ob es für eine bestimmte Klasse von Problemen überhaupt einen Algorithmus gibt.[15] Umfaßt die Klasse eine endliche Menge von Problemen, so läßt sich an sich für jeden einzelnen Fall prüfen, ob er lösbar ist oder nicht. Handelt es sich dagegen um eine *unendliche* Klasse von Problemen, so ist die Frage sehr viel schwieriger zu beantworten. Denn in diesem Fall reicht einfaches Ausprobieren nicht mehr aus. Und noch problematischer wird es, sobald es sich um eine Frage handelt, wie sie Turing zu beantworten suchte, nämlich: kann man beweisen, daß es für ein Problem *keine* algorithmische Lösung gibt? Eine solche Frage bezieht sich nicht mehr auf einen einzelnen Algorithmus, sondern auf die Gesamtheit aller Algorithmen. Um nachzuweisen, daß es für diesen Problemkreis tatsächlich keinen Algorithmus gibt, muß man *alle* Algorithmen in den Blick nehmen, und dafür reicht der intuitive Algorithmusbegriff, so wie ich ihn vorhin dargestellt habe, nicht mehr aus. Vielmehr ist dazu eine Definition erforderlich, die auf einer sehr viel abstrakteren Ebene alle denkbaren Algorithmen umfaßt, auch die erst noch zu entdeckenden – und genau das haben die Mathematiker getan, die sich im ersten Drittel dieses Jahrhunderts um eine Präzisierung des Algorithmusbegriffs bemühten. »Only in the present century did people begin to think intensively about exactly what an algorithm is, or about what decidability and computability really mean. The idea of an algorithm, or of a decision or computation procedure, is sufficiently real so that in two thousand years of examples mathematicians had no trouble in agreeing in each particular case of an infinite class of questions with a procedure they had in hand that the procedure is an algorithm for the class of questions or is not. But this history – these examples – do not provide a concrete picture of what the totality of *all* possible algorithms looks like. Without such a picture there

15 Denn nicht jede Frage ist entscheidbar und nicht jede Funktion ist berechenbar. In diesem Zusammenhang muß (1) zwischen *entscheidbaren* und sog. rekursiv *aufzählbaren* 'ja/nein'-Fragen und (2) zwischen *allgemein-rekursiven* und *partiell-rekursiven* Funktionen unterschieden werden. So ist beispielsweise jede allgemeingültige Formel des Prädikatenkalküls durch ein algorithmisches Verfahren erzeugbar (=rekursiv aufzählbar), es gibt jedoch nach dem Satz von Church (und Turing) kein Verfahren, mit dem man für jede beliebige Formel entscheiden kann, ob sie allgemeingültig ist oder nicht. Ebenso ist es möglich, daß ein Algorithmus zur Beantwortung einer 'Was'-Frage nur für gewisse Argumente ein Resultat liefert und bei anderen, ohne abzubrechen, beliebig lange weiterläuft (partiell-rekursive Funktionen). Es ist dem Verfahren selbst in der Regel nicht anzusehen, ob es eine allgemeine oder nur eine partielle Funktion berechnet.

is no possibility of showing that for some infinite class of questions an algorithm does not exist.« (Kleene 1988: 20)

Um ein solches Bild bemühten sich in den 30er Jahren verschiedene Mathematiker, zum größten Teil unabhängig voneinander. Im Zentrum stand dabei die Frage, wie die Klasse der berechenbaren Funktionen, d.h. jener Funktionen, für die ein Algorithmus existiert, mathematisch präzise zu charakterisieren ist. Jacques Herbrand und Kurt Gödel führten Anfang der 30er Jahre den Begriff der allgemein-rekursiven Funktionen ein und Alonzo Church und Stephen Kleene entwickelten zur gleichen Zeit das Konzept der λ-Definierbarkeit. Kleene bewies 1936, daß beide Konzeptionen äquivalent sind, und Church stellte im selben Jahr die These auf, daß die Klasse der berechenbaren Funktionen exakt zusammenfällt mit den allgemein-rekursiven bzw. λ-definierbaren Funktionen. Der intuitive Begriff der berechenbaren Funktion ist mit anderen Worten identisch mit dem mathematisch präzisen Begriff der allgemein-rekursiven Funktion.[16] Das ist die berühmte *Churchthese*, die Church selbst folgendermaßen formulierte: »We now define the notion, already discussed, of an effectively calculable function of positive integers by identifying it with the notion of a recursive function of positive integers (or of a λ-definable function of positive integers). This definition is thought to be justified by the considerations which follow, so far as positive justification can ever be obtained for the selection of a formal definition to correspond to an intuitive notion.« (Church 1936: 100)

Die Churchsche These ist wie die ihr verwandte These von Turing, auf die ich im folgenden zu sprechen kommen werde, eine *These* und nicht ein mathematisches Theorem. Dies deshalb, weil sie als Element den intuitiven Begriff der berechenbaren Funktion (bzw. des Algorithmus) enthält, der über diese These ja gerade definiert werden soll. Damit die These zu einem Theorem würde, müßte man den intuitiven Begriff durch eine formale Definition ersetzen, aber damit hätte man das Problem bloß verschoben und nicht gelöst. Denn damit stünde man letztlich wieder vor demselben Problem, nämlich: »Is the introduced formalization equivalent to the intuitive notion? The solution of this problem would require another Church's thesis, and so we would end up with an infinite regres-

16 Inwiefern sich der Algorithmusbegriff über den λ-Kalkül bzw. die Theorie rekursiver Funktionen präzisieren läßt (und was damit überhaupt gemeint ist), brauche ich für meine Fragestellung nicht weiter auszuführen. Eine instruktive und gleichzeitig wenig technische Darstellung dieser 'confluence of ideas' in den 30er Jahren gibt Gandy 1988.

sion.« (Salomaa 1985: 77f.) Dennoch wird die Churchsche These, und dies gilt auch für die These von Turing, praktisch vorbehaltlos akzeptiert. Für ihre Glaubwürdigkeit sprechen nicht zuletzt auch 'empirische' Gründe. Bislang wurde noch keine berechenbare Funktion entdeckt, die nicht allgemein-rekursiv bzw. Turing-berechenbar ist. Turing selbst hat seine These auf sehr ungewöhnliche Weise plausibilisiert. Davon wird später noch die Rede sein.[17]

Im gleichen Jahr, als Church seine These publizierte und damit einen Vorschlag machte, wie der intuitive Begriff der berechenbaren Funktion mathematisch präziser zu fassen sei, erschienen zwei weitere Arbeiten zum selben Thema. Alan Turing präsentierte seine Maschinendefinition des Algorithmusbegriffs, und Emil Post, ein amerikanischer Logiker, gelangte zu einer weiteren Präzisierung, und zwar mit Hilfe einer Argumentation, die praktisch deckungsgleich war mit jener von Turing (mit einem gewichtigen Unterschied allerdings). Im gleichen Jahr, 1936, erschienen also unabhängig voneinander mehrere Arbeiten zum selben Thema, zwei davon mit einer praktisch identischen Argumentation. Daß diese Übereinstimmung vermutlich auch außermathematische Gründe hat, werde ich in Kapitel 4 zu zeigen versuchen.

Turing war damals also nicht der einzige Mathematiker, der sich um eine Präzisierung des Algorithmusbegriffs bemühte, aber das Vorgehen, das er wählte, unterschied sich wesentlich von den Überlegungen, wie sie etwa Alonzo Church oder Stephen Kleene anstellten. Church und Turing »had their own independent inspirations«, schreibt Kleene, der in dieser Zeit zusammen mit Church in Princeton arbeitete, ihre Vorstellungen hätten ganz andere Wurzeln gehabt (Kleene 1987: 492). Im Gegensatz zu Church (und zu Kleene) ging Turing (und dies gilt auch für Post) vom Prozeß der *Berechnung* aus. »The real question at issue« sei die, schreibt er in seinem Aufsatz 1936, »'What are the possible processes which can be carried out in computing a number?'« (Turing 1936: 135) Anstatt zu fragen: wodurch ist die Klasse der berechenbaren Funktionen charakterisiert, setzten Turing (und Post) beim Vorgang der Berechnung selbst an - und ersetzten damit eine rein mathematische Frage durch eine in gewissem Sinne psychologische: Was tut ein Mensch, der einer Vorschrift folgt?

Was tut ein Mensch, der einer Vorschrift folgt, z.B. rechnet? Er verhält sich mechanisch, sagte sich Turing, wie eine Maschine. Oder wie ein

17 Zu weiteren Begründungsversuchen vgl. Church 1936: 100ff.; Gandy 1988: 77ff.

Fließbandarbeiter. Das war die Antwort von Post. Ein Algorithmus ist eine Vorschrift, die ich rein mechanisch ausführen kann, ohne zu denken, »like a robot«, wie Stephen Kleene das Handeln nach Vorschrift beschreibt (Kleene 1988: 18). Was man mechanisch tut, das kann aber auch, und das war Turings entscheidende Idee, von einer *Maschine* getan werden. Tatsächlich, und nicht mehr bloß in einem übertragenen Sinn, wie die Mathematiker vor ihm noch gedacht hatten. »We may take this statement literally«, schrieb er drei Jahre später, »understanding by a purely mechanical process one which could be carried out by a machine.« (Turing 1939: 160)

Um den Algorithmusbegriff zu präzisieren, schlug Turing damit einen für die Mathematik eher ungewöhnlichen Weg ein. Im Gegensatz zu Church oder Kleene (und zu den meisten Mathematikern überhaupt) wählte er als Ausgangspunkt nicht eine abstrakte Größe, die berechenbaren Funktionen z.B., sondern ging, sehr viel konkreter, vom Rechenprozeß selbst aus – davon, was jemand tut, der einer Vorschrift folgt. Turing entwickelte also zunächst einmal ein Modell algorithmischen Vorgehens, ein sehr idealisiertes Modell allerdings, das den menschlichen 'computer' als regelbefolgende Maschine konzipierte – als »Papiermaschine«, wie er ihn später auch zu nennen pflegte –, und zeigte dann anschließend, daß man sich eine Maschine vorstellen kann, die im Prinzip genau gleich vorgeht und zu den gleichen Leistungen fähig ist wie ein Mensch, der einer klaren Vorschrift folgt. Das ist, kurz zusammengefaßt, die Grundargumentation von Turing. Wie sie im einzelnen aussieht, das möchte ich nun etwas ausführlicher darstellen.[18]

18 Das geht nicht ohne einige technische Details, die zu kennen mir aber notwendig scheint, will man die philosophischen und soziologischen Implikationen von Turings Arbeit wirklich verstehen.

> Man könnte sich eine Maschine ausdenken, in die man die Axiome an einem Ende einführen würde, während die Theoreme am anderen Ende herauskommen, wie bei der sagenhaften Maschine in Chikago, bei der die Schweine lebend eingefüttert werden und als Schinken und Würstchen wieder zum Vorschein kommen.
>
> *Henri Poincaré*[19]

*On Computable Numbers* nannte Alan Turing seinen Aufsatz – von 'berechenbaren' Zahlen handelte er also. Turings Definition zufolge sind berechenbare Zahlen »real numbers whose expressions as a decimal are calculable by *finite* means«, und er präzisierte diese Definition, indem er hinzufügte: »a number is computable if its decimal can be written down *by a machine*« (Turing 1936: 116).[20] Turings 'berechenbare' Zahlen sind also reelle Zahlen, für deren Konstruktion es klare Regeln, d.h. einen Algorithmus gibt. Das gilt selbstverständlich nicht für alle reellen Zahlen. Die meisten reellen Zahlen sind, wie Funktionen überhaupt, nicht berechenbar in Turings Sinn. 'Maschinen', die berechenbare Zahlen erzeugen können, die Zahl $\pi$ z.B. oder die Wurzel aus 2, nannte er »circle-free«, und die ihnen entsprechende unendliche Ziffernfolge bezeichnete er als 'berechenbare Folge', als »computable sequence« (119). Um die Unmöglichkeit eines allgemeinen Entscheidungsverfahrens zu beweisen, hatte Turing also zu zeigen, daß es keine 'Entscheidungsmaschine' geben kann.

Eine 'berechenbare' Zahl ist eine Zahl, deren Dezimalausdruck durch eine Maschine berechnet werden kann. Aber wie hat man sich eine solche Maschine vorzustellen? Und weshalb sprach Turing von Maschinen, und nicht einfach von Erzeugungsregeln oder Algorithmen oder ähnlichem? Bevor er an Maschinen dachte, schien er allerdings an *Menschen* zu denken. Zumindest führte er, auf den ersten Blick einigermaßen unmotiviert, seine 'Maschine' in Analogie zu einem Menschen ein, der rechnet. »We may compare a man in the process of computing a real number to a machine which is only capable of a finite number of conditions $q_1$, $q_2$, ..., $q_R$.« (Turing 1937: 117) Was beim menschlichen Rechner das Papier ist, auf das er seine Zeichen schreibt, ist bei Turings 'Maschine' ein (allerdings *unendlich* langes) Band: »The machine is supplied with a

19 Poincaré 1908, zit. in Mehrtens 1990: 246.

20 Unterstreichung von mir. Ich halte mich im folgenden an den Argumentationsaufbau von Turing.

'tape' (the analogue of paper) running through it.« (Turing 1936: 117) Das Band ist unterteilt in Felder, auf denen je ein Symbol stehen kann, im einfachsten Fall ein Strich. Zu jedem Zeitpunkt wird von der Maschine immer nur genau *ein* Feld bearbeitet. Turing nannte dieses Feld – bzw. das entsprechende Zeichen – 'abgetastetes' Zeichen: »scanned symbol«. Das Band kann von der Maschine vorwärts oder rückwärts verschoben werden, aber immer nur um ein Feld pro Mal.

Das Verhaltensrepertoire der Maschine selbst ist auf einige wenige Grundoperationen beschränkt: Einlesen von Zeichen; Zeichen löschen bzw. überschreiben; Bewegung nach rechts, Bewegung nach links; Anhalten. Was sie bei jedem einzelnen Operationsschritt tut, ist vollkommen determiniert durch den Zustand $q_i$, in dem sie sich zu diesem Zeitpunkt befindet, und dem Symbol $s_k$, das sie gerade eingelesen hat. Je nachdem in welchem Zustand sie sich befindet, verhält sie sich in derselben Situation anders. Wenn sie z.B. das Symbol $s_1$ eingelesen hat, die Ziffer '1' z.B., und im Zustand $q_1$ ist, löscht sie das Symbol, wechselt in den Zustand $q_2$ und verschiebt das Band um ein Feld nach rechts. Wenn sie sich im Zustand $q_2$ befindet, läßt sie das Symbol $s_1$ stehen, behält den Zustand bei und verrückt das Band um ein Feld nach links. Die jeweilige Kombination von Zustand und Zeichen, d.h. das Paar $(q_i,s_k)$, nannte Turing 'Konfiguration': »Thus the configuration determines the possible behaviour of the machine.« (Turing 1936: 117) Soweit die gewissermaßen technische Beschreibung, die Turing von seiner 'Maschine' gab. Und er beschloß diesen Abschnitt mit der These, daß diese einfache Maschine, die nur über einige wenige Grundoperationen verfügt, *alle* berechenbaren Zahlen zu erzeugen vermag, auch die kompliziertesten und längsten: »It is my contention that these operations include all those which are used in the computation of a number.« (Turing 1936: 118)

Etwas allgemeiner formuliert und in der Form, wie sie heute üblich ist: Eine Turingmaschine besteht aus zwei Teilen – einem Lese- bzw. Schreibkopf und einem unendlich langen Band, das in Felder unterteilt ist. Auf jedem Feld kann genau ein Symbol aus einem endlichen Alphabet $S = \{s_0, s_1, \ldots, s_n\}$ eingetragen sein. In einem gegebenen Moment sind immer nur endlich viele Felder markiert, der Rest der Felder ist leer bzw. enthält das spezielle Leerzeichen $s_0$.[21] Die Zeichenfolge, die auf dem Band steht, nennt man 'Bandinschrift'. Das Band hat Speicher-

21 Aus praktischen Gründen nimmt man gewöhnlich an, daß das leere Feld nicht unbeschriftet ist, sondern durch das leere Symbol $s_0$ markiert ist.

funktion und wird zur Dateneingabe und -ausgabe benutzt. Die Zeichen, die auf dem Band stehen, bevor die Maschine mit ihrer Berechnung beginnt, repräsentieren die Argumente der zu berechnenden Funktion; die Symbole, die sie während ihrer Berechnung hinschreibt und dann wieder löscht, haben den Status von Zwischenergebnissen, von »rough notes to assist the memory« (118), wie Turing schreibt; und die Zeichenfolge, die auf dem Band steht, nachdem sie angehalten hat, drückt das Ergebnis aus, in diesem Fall die von der Maschine berechnete Zahl. Die Maschine selbst 'verkörpert' den Algorithmus zur Funktionsberechnung, er ist gewissermaßen in sie eingebaut.[22] »The idea is that an algorithm or computation procedure for $\phi(a)$ can be embodied in a Turing machine which, when we feed it a tape on which a particular value of the variable $a$ is represented, will perform acts terminating in a situation in which the corresponding value $b = \phi(a)$ of the function is also represented.« (Kleene 1988: 26)

Die Maschine selbst kann verschiedene, aber nur endlich viele innere Zustände $Q = \{q_o, q_1, \ldots, q_m\}$ einnehmen. Zu den Zuständen gehören auch der Anfangszustand $q_0$ und der Haltezustand $q_h$. Die Operationsweise der Maschine besteht darin, die Anfangskonfiguration der Zeichen auf dem Band sukzessiv in eine neue Zeichenfolge umzuwandeln, indem sie Schritt für Schritt Zeichen löscht oder überschreibt und sich anschließend nach rechts bewegt oder nach links. Sie kann dabei je Operationsschritt aber immer nur *ein* Zeichen einlesen bzw. löschen oder überschreiben, und sie verschiebt sich auch immer nur um *ein* Feld pro Mal, entweder nach rechts oder nach links. Ist die Maschine einmal in Gang gesetzt, dann geht sie automatisch vor, sie bewegt sich nach rechts oder links auf dem Band, löscht ein Zeichen oder überschreibt es und wechselt je nachdem ihren Zustand, bis sie vielleicht irgendwann einmal anhält.

Auf der Ebene der Einzeloperation, auf 'lokalem' Niveau gewissermaßen, ist das Verhalten der Turingmaschine vollkommen determiniert durch den Zustand, in dem sie sich gerade befindet, und dem eingelesenen Symbol.[23] Durch die 'Konstruktionsweise' der Maschine ist also für

22 Turing hat noch eine andere Variante formuliert, eine eher 'software'-orientierte, wie man heute sagen würde. Ich komme darauf zurück.

23 Neben einer solchen deterministischen Maschine, Turing nennt sie in seinem Aufsatz 'automatische Maschine', führt er noch eine andere Maschinenform ein, eine sog. 'Wahlmaschine', deren Verhalten nur partiell determiniert ist (Turing 1936: 118). Solche Maschinen, die bei einzelnen Schritten zwischen alternativen Fortsetzungsmöglichkeiten wählen können (vgl. Kalkül), nannte er später 'partiell zufallsbestimmte' Maschinen (vgl. z.B. Turing 1948: 9). In der theoretischen Informatik

jede Kombination von Zustand und eingelesenem Symbol – für jede 'Konfiguration' in Turings Terminologie – genau spezifiziert, was die Maschine bei jedem einzelnen Operationsschritt tut. Allgemeiner formuliert folgt die Turingmaschine in ihrem Verhalten einer endlichen Menge von Befehlen, die sich abstrakt in folgende Form bringen lassen:

$q_i s_k q_j s_l R$ oder $q_i s_k q_j s_l L$ oder $q_i s_k q_j s_l N$.

Wenn die Maschine im Zustand $q_i$ ist und das Symbol $s_k$ einliest, wechselt sie in den Zustand $q_j$, ersetzt $s_k$ durch $s_l$ und bewegt sich nach rechts, links oder überhaupt nicht, je nachdem ob das letzte Symbol im jeweiligen Quintupel R, L oder N ist.[24] Zusammengenommen bilden die einzelnen Befehle das 'Programm' der Turingmaschine, den Algorithmus, den sie verkörpert. Sie lassen sich in Form einer zweidimensionalen Matrix darstellen. Eine solche *Verhaltenstabelle*, wie Turing diese Matrix genannt hat, ist nichts anderes als eine spezifische Form der Darstellung eines Algorithmus. Sie beschreibt das Verhalten der ihn verkörpernden Turingmaschine. Mit der Idee der Verhaltenstabelle hatte Turing einen Weg gefunden, eine unendliche (berechenbare) Dezimalzahl, z.B. die Zahl $\pi$, in *endlicher* Form darzustellen (Hodges 1989: 118). Gemäß der heute üblichen Darstellungsweise sind in der Horizontalen die Zustände $q_1$, ...., $q_m$ eingetragen, die die Turingmaschine einnehmen kann, in der Vertikalen stehen die möglichen Symbole $s_1$, ..., $s_n$, und in den Feldern, die sich daraus ergeben, ist aufgeführt, was die Maschine tut bzw. zu tun hat, wenn sie sich im Zustand $q_i$ befindet und auf das Symbol $s_k$ stößt. Um ein Beispiel zu geben: Die untenstehende Verhaltenstabelle definiert eine Turingmaschine, die beliebige Werte addieren kann:

heißen diese Maschinen heute 'nicht-deterministische' Turingmaschinen. Da diese Unterscheidung bei der Darstellung hier keine Rolle spielt, gehe ich nicht näher darauf ein.

24 R steht für 'Bewegung nach rechts', L für 'Bewegung nach links' und N für 'Anhalten'.

*Tabelle 1*

| Symbol | Zustände[25] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $q_1$ | $q_2$ | $q_3$ | $q_4$ |
| $s_1$ | $s_1q_2R$ | $s_1q_2R$ | $s_1q_3R$ | $s_0q_4N$ |
| $s_0$ | $s_0q_1R$ | $s_1q_3R$ | $s_0q_4L$ | $s_0q_4N$ |

Sobald die durch diese Verhaltenstabelle spezifizierte Maschine in den Zustand $q_4$ übergeht, hält sie an, unabhängig davon, ob das Feld, auf dem sie steht, leer ist ($s_0$) oder eine Markierung enthält ($s_1$). Im letzteren Fall löscht sie die Markierung und bleibt erst dann stehen.

Durch eine solche Verhaltenstabelle – oder 'Maschinentafel' wie man sie heute nennt –, ist eine Turingmaschine vollständig definiert. Da die Verhaltenstabelle alle relevanten Informationen enthält, ist es an sich irrelevant, ob die Maschine praktisch realisiert ist oder nicht. Was sie tut und zu tun imstande ist, ist in der Maschinentafel festgehalten. So gesehen *ist* die Maschinentafel die Turingmaschine. Die Apparatur selbst, so wie sie Turing beschrieben hat, hat nur veranschaulichende Funktion. Sie führt konkret vor, was es heißt, einer expliziten Vorschrift zu folgen, und kommt damit dem intuitiven Algorithmusbegriff sehr viel näher als es die anderen Präzisierungen des Algorithmusbegriffs tun[26]: »The very nature of a definite method (is) that it had to be applied *mechanically*.« (Hodges 1988: 4) Diese Vorstellung hat Turing zum Bild einer Maschine verdichtet, über den Umweg eines mechanisch handelnden Menschen allerdings, und anschließend mit seiner Idee der Verhaltenstabelle in eine mathematisch abstrakte Form gebracht.

So gesehen gibt es so viele Turingmaschinen (und damit auch Turingtafeln) wie es berechenbare Funktionen bzw. berechenbare Zahlen (im Turingschen Sinne) gibt. Oder umgekehrt: Jeder berechenbaren Funktion entspricht eine spezifische Turingmaschine $T_k$ und jede spezifische Turingmaschine ist durch eine Maschinentafel $M_k$ vollständig definiert. Turing führt nun aber noch eine andere Maschine ein, eine Metamaschine gewissermaßen, die er *universelle* Maschine nennt: »It is possible to invent a single machine which can be used to compute *any* computable sequence.« (Turing 1936: 127) Turings universelle Maschine $U$ kann alles

25 Das Beispiel habe ich Hodges 1989 entnommen (S. 116f.). Das Symbol '$s_1$' steht in diesem Beispiel für einen Strich, das Symbol $s_0$ für ein leeres Feld.

26 Mit Ausnahme jener von Emil Post; vgl. dazu Kap. 4.

tun, wozu die speziellen Turingmaschinen nur je einzeln in der Lage sind. Und dies heißt insbesondere, daß sie *alle* berechenbaren Zahlen berechnen kann (und nicht bloß immer nur je eine). Die universelle Maschine ist die Simulationsmaschine schlechthin. Sie kann, wie es Turing später formulierte, alles tun »that could be described as 'rule of thumb' or 'purely mechanical'« (Turing 1948: 7). Dazu ist bloß erforderlich, daß man die Maschinentafel, die das Verhalten der simulierten Maschine definiert, ihr Programm mit anderen Worten, in verschlüsselter Form auf das Band der universellen Maschine *U* überträgt, zusammen mit den Eingabewerten.[27] »When we have decided what machine we wish to imitate we punch a description of it on the tape of the universal machine. This description explains what the machine would do in every configuration in which it might find itself. The universal machine has only to keep looking at this description in order to find out what it should do at each stage. Thus the complexity of the machine to be imitated is concentrated in the tape and does not appear in the universal machine proper in any way.« (Turing 1947: 112)

Zur formalen Beschreibung der universellen Maschine reichen, wie Marvin Minsky gezeigt hat, sieben Zustände und ein aus vier Zeichen bestehendes Alphabet aus (Haugeland 1987: 121). Die Maschinentafel, die Turing in seinem Aufsatz darstellt, ist zwar etwas komplizierter, aber er konnte damit nachweisen, daß seine universelle Maschine tatsächlich alle anderen Maschinen zu imitieren imstande ist. Turings universelle Maschine *U* kann alles berechnen, was berechenbar ist; sie kann alles ausführen, wofür es eine klare Vorschrift gibt. Anstatt für jede einzelne Aufgabe eigens eine passende Turingmaschine zu 'konstruieren', brauche man, wie er 1948 schrieb – sprachlich bereits inspiriert von den 'realen' Maschinen, die man zu dieser Zeit zu bauen begann –, die universelle Maschine bloß 'umzuprogrammieren': »The importance of the universal machine is clear. We do not need to have an infinity of different machi-

27 Da man die Verhaltenstabelle nicht als solche auf das Band übertragen kann, muß sie zuerst codiert werden. Turing ordnete dazu jeder Maschinentafel bzw. Maschine eine 'description number' zu, d.h. eine natürliche Zahl, die durch eine endlich lange Ziffernfolge, z.B. '13456786423' repräsentiert wird. Die Maschine, deren Beschreibungszahl *n* ist, wird als *M(n)* bezeichnet. Die universelle Turingmaschine *U* hat dann diese (in ihre Symbolsprache übersetzte) Beschreibungszahl zu lesen, sie als Tabelle zu entschlüsseln und die entsprechende Befehle auszuführen (vgl. dazu u.a. Webb 1980: 228ff.). Damit hat Turing, zehn Jahre bevor es die ersten Computer gab, das Konzept der Programmspeicherung formuliert. Ich komme in Kapitel 6 darauf zurück.

nes doing different jobs. A single one will suffice. The engineering problem of producing various machines for various jobs is replaced by the office work of 'programming' the universal machine to do these jobs.« (Turing 1948: 7)

Was aber hat dies alles mit Hilberts Entscheidungsproblem zu tun? Hilbert hatte nach einem allgemeinen Verfahren gesucht, mit dem man für jede beliebige Formel entscheiden kann, ob sie beweisbar ist oder nicht. Was Hilbert 'Verfahren' genannt hatte, hat Turing umdefiniert in 'berechenbar durch eine Maschine': Ein allgemeines Verfahren, ein Algorithmus, ist etwas, was auch von einer Maschine ausgeführt werden kann: »The expression 'there is a general process for determining ....' has been used (...) as equivalent to 'there is a *machine* which will determine ...'.« (Turing 1936: 134) Aus Hilberts Entscheidungsproblem hat Turing eine Frage gemacht, die formulierbar war in Termini seiner Maschinen: Gibt es eine Turingmaschine, die für jede x-beliebige Turingmaschine (eingeschlossen sie selbst) entscheiden kann, ob sie zu einem Ergebnis gelangt oder nicht? Das ist das berühmte *Halteproblem*, und wie Turing es löste, möchte ich im folgenden kurz beschreiben.[28]

Für jede berechenbare Zahl gibt es, das hatte Turing vorgeführt, eine Turingmaschine, die sie berechnen kann. Jede berechenbare Dezimalzahl zwischen 0 und 1, jede »computable sequence«, wie er sie auch nannte, ist mit anderen Worten durch eine endliche Verhaltenstabelle definiert. Diese Verhaltenstabellen lassen sich der Reihe nach auflisten. Einfachheitshalber versieht man sie dazu mit einem Index, indem man z.B. jeder Tabelle eine natürliche Zahl 1, 2, ..., n zuordnet. Anstatt die Tabellen auf diese Weise relativ willkürlich zu numerieren, hat Turing sie systematisch verschlüsselt, ähnlich wie es auch Kurt Gödel getan hatte, als er für seinen Unvollständigkeitsbeweis den Zeichen, Formeln und Beweisen nach einem klaren Verfahren Zahlen zuordnete. Das Ergebnis war, daß sich nun jeder möglichen Verhaltenstabelle eine Ziffernfolge zuordnen ließ, eine 'description number', wie Turing sie nannte – und es ist, genau genommen, diese Ziffernfolge, die dann als 'Instruktion' auf das Band der universellen Maschine *U* übertragen wird (vgl. Anm. 27, S. 84).

Die Verhaltenstabelle, die z.B. die Turingmaschine $T_L$ definiert, die an eine 1er-Sequenz immer eine 1 anfügt, hat dann etwa die Beschreibungsnummer 177642, und die Ziffernfolge 7845 repräsentiert z.B. eine Turingmaschine $T_M$, die niemals ein abschließendes Resultat liefert,

28 Ich halte mich hier an die Darstellung von Penrose 1989: 57ff.

sondern endlos weiterläuft. Bringt man nun alle natürlichen Zahlen 1, 2, 3, ...., 7845, ....., 177642, ....., n,.... in eine Liste, so sind einige davon, aber vermutlich nicht alle, »satisfactory numbers« – Beschreibungsnummern von funktionierenden Turingmaschinen. Hat man eine solche Liste, dann wäre es natürlich interessant zu wissen, ob z.B. die Ziffernfolge '3785976972' eine 'satisfactory number' ist oder ob sie eine Turingmaschine definiert, die nie zu einem Resultat kommt, ähnlich wie es Hilbert interessierte zu wissen, ob eine x-beliebige Formel beweisbar ist oder nicht. Um diese Frage möglichst effizient zu beantworten, nicht nur für die Ziffernfolge '3785976972', sondern für alle Zahlen in der Liste, bräuchte man eine Art 'Entscheidungsmaschine', eine Turingmaschine *H*, die für jede beliebige Ziffernfolge entscheiden kann, ob sie die Beschreibungszahl einer funktionierenden Turingmaschine ist oder nicht. Und die Frage, die sich Turing nun stellte, war die, ob es tatsächlich eine solche Maschine gibt.

Um diese Frage zu beantworten, wandte Turing ein berühmtes Verfahren an, einen mathematischen Trick gewissermaßen. Georg Cantor hatte dieses Verfahren, die sog. 'Diagonalmethode', entwickelt, um zu beweisen, daß es 'mehr' reelle Zahlen gibt als natürliche, daß, etwas technischer ausgedrückt, die Menge der reellen Zahlen, das Kontinuum, 'mächtiger' ist als die Menge der natürlichen Zahlen (vgl. S. 32). Wie die Diagonalmethode im einzelnen funktioniert, soll hier nicht weiter ausgeführt werden. Ihre Pointe besteht jedenfalls darin, daß sich ausgehend von etwas Gegebenem, den berechenbaren Zahlen z.B., mit dieser Methode etwas grundlegend Neues konstruieren läßt. Aus dem Rationalen konnte man damit, wie Cantor gezeigt hat, das Irrationale entstehen lassen, und aus dem Berechenbaren, wie Turing vorführte, das Unberechenbare.

Turing ging dabei, aus taktischen Gründen gewissermaßen, von der Annahme aus, daß es tatsächlich eine Turingmaschine $H(n,m)$ gibt, die für jede einzelne Turingmaschine $T_n$ berechnen kann, ob sie anhält oder nicht, wenn sie den input $m$ bearbeitet. Dazu brauchte man ihr bloß die Beschreibungszahlen der einzelnen Turingmaschinen $1,2,\ldots,n,\ldots$ einzugeben zusammen mit den Eingabewerten $1,2,\ldots,m,\ldots$ . Immer wenn die Maschine $H(n,m)$ zum Resultat gelangt, daß die Turingmaschine $T_n$ auf dem input $m$ niemals anhält, druckt sie als Ergebnis '0' aus. Damit weist sie offensichtlich eine Fähigkeit auf, die sie von einem menschlichen Beobachter grundlegend unterscheidet. Denn ein menschlicher Beobachter kann nicht von vornherein wissen, ob die Ziffernfolge, die von einer Turingmaschine $T_n$ produziert wird, irgendwann einmal ein Ende findet – so wenig wie der formalistische Mathematiker von vornherein entscheiden kann, ob eine x-beliebige Formel ableitbar ist oder nicht.[29]

Mit Hilfe einer solcher Turingmaschine $H(n,m)$ ließe sich problemlos eine Tabelle erstellen, in der für jede Turingmaschine $1, 2, \ldots, n, \ldots.$ und für jedes mögliche Argument $1,2,\ldots m, \ldots.$ entweder der berechnete Funktionswert aufgeführt oder markiert wäre, daß es sich in diesem Fall um eine 'unsatisfactory' Turingmaschine handelt, um eine Turingmaschine also, die niemals anhält. Eine solche Tabelle könnte, vereinfacht dargestellt, etwa so aussehen:

*Tabelle 2*

| | Eingabewerte | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Beschreibungszahl | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | ... |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ... |
| 3 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | ... |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ... |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | ... |
| 7 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | ... |
| . | . | . | . | . | . | . | . | ... |
| . | . | . | . | . | . | . | . | ... |
| 177641 | 8 | 817 | 22 | 7899 | 818 | 4379 | 12498 | ... |
| . | . | . | . | . | . | . | . | ... |
| . | . | . | . | . | . | . | . | ... |

Gemäß der Berechnung von $H(n,m)$ halten $T_1$ und $T_5$ niemals an, was auch immer ihre Eingabewerte sind. $T_3$ ist dagegen eine 'zufriedenstellende' Turingmaschine, allerdings nur dann, wenn die Eingabewerte gerade Zahlen sind. Andernfalls hält sie ebenfalls nie an. Unter der Annahme, daß $H(n,m)$ tatsächlich existiert, entspricht jede Zeile in dieser

29 Ist die Formel A beweisbar, dann wird man irgendwann einmal zu ihr gelangen. Ist sie aber nicht beweisbar, wird man nie, wie lange man auch durchprobiert, auf sie stoßen. Nur kann man das niemals von vornherein wissen. Es ist zwar möglich, alle denkbaren Beweise der Reihe nach aufzuzählen. Auf diese Weise läßt sich an sich ganz mechanisch eruieren, ob der Beweis einer gegebenen Formel oder ihre Widerlegung in der Liste vorkommt oder ob die Formel grundsätzlich unentscheidbar ist. Man braucht dazu nur Schritt für Schritt die Liste durchzugehen. Während man danach sucht, weiß man jedoch nicht, wie das Ergebnis aussehen wird. Ist man noch nicht auf den Beweis der Formel bzw. ihre Widerlegung gestoßen oder ist sie tatsächlich nicht beweisbar? Mit der 'Museumsmethode' (Webb) hat man, anders formuliert, nur im positiven Fall sicheren Erfolg.

Tabelle einer berechenbaren Folge, und umgekehrt muß jede berechenbare Folge auch irgendwo in dieser Tabelle auftauchen. Mittels des Diagonalverfahrens läßt sich nun aber eine Dezimalzahl konstruieren, die sog. Diagonalzahl, die in der Tabelle nicht enthalten ist.[30] Daraus ergibt sich nun aber offensichtlich ein Widerspruch. Denn einerseits wurde diese Zahl nach einem klaren Verfahren konstruiert und müßte folglich auch irgendwo in der Tabelle enthalten sein. Gleichzeitig läßt sich aber zeigen, daß dies nicht der Fall ist. Die Diagonalzahl ist eine Zahl, die von *H(n,m)* allem Anschein nach nicht erzeugbar ist (denn sonst wäre sie ja in der Tabelle enthalten). Wie läßt sich dieser Widerspruch auflösen? Offensichtlich nur so, daß man die ursprüngliche Annahme fallen läßt: Es ist nicht möglich, eine solche Tabelle zu erstellen, d.h. es gibt keine Turingmaschine *H(n,m)*, die für jede andere Maschine immer entscheiden kann, ob sie anhält oder nicht.[31]

Turings Maschine hat keine größere Kompetenz als der menschliche Beobachter (aber auch keine geringere, wie die Vertreter einer mechanistischen Theorie des Geistes sagen würden).[32] Beide – weder Mensch noch universelle Maschine – sind in der Lage, für jede beliebige Turingmaschine zu entscheiden, ob sie ihre Berechnung irgendwann einmal beenden wird oder ob sie endlos weiterläuft. Für eine einzelne Maschine mag eine solche Beurteilung vielleicht noch möglich sein, aber es gab, wie Turing gezeigt hat, kein *allgemeines* Verfahren – und das heißt: keine Turingmaschine –, die für *jede* Turingmaschine (bzw. für deren Beschreibungszahl) beurteilen kann, ob sie 'zufriedenstellend' ist oder nicht. Hilberts Frage nach der Existenz eines allgemeinen Entscheidungsverfahrens muß offensichtlich negativ beantwortet werden. Es ist nachweisbar unmöglich, einen Entscheidungsalgorithmus dafür anzugeben, ob eine beliebige Formel formal beweisbar ist oder nicht. Damit war Turing zum gleichen Resultat gelangt wie Alonzo Church einige Wochen vor ihm, wenn auch auf ganz anderem Wege. Fast am selben Tag, an

---

30 Daß sie in ihr nicht enthalten sein kann, läßt sich leicht zeigen. Man nimmt die Diagonalzahl, in diesem Beispiel 01010013..., und zählt zu jeder Ziffer eine 1 hinzu. 0 wird damit in 1 verwandelt, 1 in 2 etc. und 9 in 0. Das ergibt in diesem Fall die unendliche Dezimalzahl 0.12121124......... Obwohl diese Zahl nach einem klaren Verfahren konstruiert worden ist, ist sie in der Tabelle nicht enthalten. Denn sie unterscheidet sich von der ersten Dezimalzahl in der ersten Dezimalstelle, von der 7ten in der 7ten Stelle und von der 177641ten in der 177641ten Stelle etc.

31 Turing hat in seinem Aufsatz noch auf andere Weise begründet, daß es eine solche Entscheidungsmaschine nicht geben kann. Ich brauche hier darauf nicht näher einzugehen.

32 Das ist die zentrale These von Webb 1980.

dem Turing seine Arbeit seinem Lehrer M.H.A. Newman vorlegte, reichte Church seinen Beweis dem *Journal of Symbolic Logic* ein.

## 3. Menschliche Maschinen

> The conclusion that man is not a machine is invalid.
>
> *Emil Post, Notes*[33]

Turing hatte bewiesen, daß es in der Mathematik keine Entscheidungsmaschine geben kann. Sein Beweis war jedoch an die Voraussetzung geknüpft, daß seine Maschinen tatsächlich *alles* berechnen konnten, was berechenbar war, daß, wie er es selbst formulierte, »the 'computable' numbers include all numbers which would naturally be regarded as computable« (Turing 1936: 135). Turing hat dem mathematisch vagen Begriff der 'Berechenbarkeit' den präzisen Sinn von 'berechenbar durch eine Turingmaschine' gegeben. Und er hat damit eine These formuliert, die von ihrer Struktur ähnlich war wie jene von Church (vgl. S. 76 f.). Church hat den intuitiven Begriff der Berechenbarkeit über den mathematisch präzisen Begriff der allgemein-rekursiven Funktion definiert, Turing hat dasselbe getan über den Begriff der Turingmaschine: »According to my definition, a number is computable if its decimal can be written down by a machine.« (Turing 1936: 116)

Daß die Operationsweise einer Turingmaschine ein allgemeines Verfahren repräsentiert, ist relativ leicht einzusehen. Weniger offensichtlich ist jedoch, ob tatsächlich *jeder* Algorithmus von einer Turingmaschine ausgeführt werden kann. Oder technischer ausgedrückt: ob die Klasse der intuitiv berechenbaren Funktionen tatsächlich mit der Klasse der auf einer Turingmaschine berechenbaren Funktionen zusammenfällt. Wie ist es möglich, daß eine so einfache Maschine mit einem so beschränkten Verhaltensrepertoire alles ausführen kann, wofür es eine klare Vorschrift gibt? Oder in einer etwas anderen Formulierung, jener, die Turing bei seinen Überlegungen leitete: Weshalb sollte seine Maschine tatsächlich alles tun können, was Menschen tun, wenn sie einer Vorschrift folgen? Und vor allem: wie konnte man sich dessen sicher sein? Wie kann man wissen, ob Turings Definition von 'Maschine' tatsächlich alles umfaßt, was als algorithmischer Prozeß beschreibbar ist?

---

33 Post 1965: 423.

Mit Sicherheit wissen kann man es nie. Denn Turings Behauptung ist eine These, genauso wie jene von Church, und nicht ein mathematisches Theorem. Sie läßt sich folglich auch nicht beweisen, sondern bloß plausibilisieren. Aber wie? Wie läßt sich begründen, daß diese einfache Maschine, die nur über einige wenige Grundoperationen verfügt: Einlesen eines Zeichens, es überschreiben oder löschen, Bewegung nach rechts, Bewegung nach links, tatsächlich jede symbolische Operation ausführen kann, sei sie auch noch so komplex, für die es eine klare Vorschrift gibt. Zur Stützung seines Argumentes hat Turing einen für die Mathematik äußerst ungewöhnlichen Weg gewählt. Er plausibilisierte nämlich seine These über eine Analyse dessen, was *Menschen* tun, wenn sie einer Vorschrift folgen, und es ist diese Analyse, die seiner Maschinenidee im Kern zugrunde liegt. Oder wie es Turings Freund Robin Gandy formuliert: »Turing machines appear as a result, as a codification of his analysis of calculation by humans.« (Gandy 1988: 83f.)

Ausgangspunkt für Turings Maschinenkonzept – und gleichzeitig Bezugspunkt für seinen Plausibilisierungsversuch – ist also ein Mensch, der einer Vorschrift folgt, z.B. rechnet: »The real question at issue is 'What are the possible processes which can be carried out in computing a number?'« (Turing 1936: 135) Was tut ein Mensch, der einem Algorithmus folgt? Die Dezimalfolge von $\pi$ berechnet, zwei Zahlen multipliziert oder einen Satz formal beweist?[34] Im Prinzip tut er dasselbe wie Turings Maschine (oder besser: die Maschine tut dasselbe wie er). Ein menschlicher 'computer' hat, wenn er rechnet, meistens ein Papier vor sich, oft ein kariertes, und auf dieses Papier schreibt er Symbole, Zahlzeichen zum Beispiel. Wie er dies tut und in welcher Reihenfolge, das ist abhängig vom Algorithmus, dem er folgt. Davon also, ob er multipliziert oder dividiert, eine Wurzel aus 2 zieht oder eine Gleichung löst. Der Rechenvorgang selbst ist ein rein mechanischer Prozeß. Denn wie man vorgeht z.B. bei einer Multiplikation, das habe ich vor Jahren in der Schule gelernt und tausendfach eingeübt. Ich verfüge mit anderen Worten über einen Algorithmus zur Multiplikation von Zahlen.

Idealisiert kann man sich das karierte Rechenblatt als ein Band vorstellen, das in Felder unterteilt ist. Jedes Feld ist entweder leer oder enthält ein Zeichen. Das Vorgehen beim Durchführen der Rechnung stellte sich

34 'Berechnung' ist hier sehr weit gefaßt zu verstehen. Es geht bei Turings Analyse keineswegs nur um Rechnen in einem engen Sinn, d.h. um das Hantieren mit Zahlzeichen, sondern sehr viel allgemeiner um formale Symbolmanipulation, d.h. um ein Operieren im Rahmen eines formalen Systems. Ich komme darauf zurück.

Turing als eine schrittweise Transformation von Zeichen auf dem Band vor. Die Rechnende beginnt bei dem ersten Symbol links, verändert es oder läßt es stehen, schaut danach auf das nächste Symbol ein Feld weiter rechts, verändert es oder läßt es stehen usw., bis die Rechnung ausgeführt ist. Zum Schluß steht eine andere Zeichenfolge auf dem Papier, und diese Abfolge repräsentiert das Resultat. Turing beschrieb also den menschlichen Rechenprozeß – oder allgemeiner: das menschliche Operieren mit Symbolen – als eine determinierte Sequenz von einzelnen, ganz elementaren Operationen: Wahrnehmen des Symbols; Überschreiben oder Löschen; Bewegung nach rechts; Bewegung nach links; Anhalten.

Was der menschliche 'computer' dabei zu jedem Zeitpunkt tut, ob ein Symbol gelöscht wird oder überschrieben, ob sich die Augen nach rechts bewegen oder nach links, das ist, so Turing, von zwei Dingen abhängig: erstens vom jeweiligen mentalen Zustand des menschlichen Rechners, seinem 'state of mind', und zweitens von dem Symbol, das er gerade wahrgenommen hat. Was er mit dem Begriff *state of mind* genau meinte, hat Turing in seinem Aufsatz nicht weiter ausgeführt. Er hat nur festgesetzt, daß die Menge der mentalen Zustände endlich sein müsse ebenso wie die Anzahl der verschiedenen Zeichen auf dem Band. Begründet hat er dieses Endlichkeitspostulat damit, daß sie andernfalls nicht voneinander zu unterscheiden seien.[35] Ähnlich wie es bereits Hilbert gefordert hatte, als er die Tintenstriche auf dem Papier an den Anfang allen mathematischen Denkens stellte – als »diskrete Objekte, die anschaulich als unmittelbares Erlebnis vor allem Denken da sind. Soll das logische Schließen sicher sein, so müssen sich diese Objekte vollkommen in allen Teilen überblicken lassen.« (Hilbert 1922: 17f.)

Dieser ersten Konzeption des algorithmischen Prozesses hat Turing ein zweites Modell gegenübergestellt – eine *Instruktionsvariante*: »We suppose (...) that the computation is carried out on a tape; but we avoid introducing the 'state of mind' by considering a more physical and definite counterpart of it. It is always possible for the computer to break off from his work, to go away and forget all about it, and later to come

35 Die Forderung, daß die Menge der mentalen Zustände endlich sein müsse (eine Annahme, der vor allem Kurt Gödel vehement widersprochen hat, vgl. Webb 1980: 222ff.), läßt sich mit der Endlichkeit der physikalischen Welt, mit dem 'principle of finiteness' begründen: »Since the brain as a physical object is finite, to store infinitely many different states, some of the physical phenomena which represent them must be 'arbitrarily' close to each other and similar to each other in structure. These items would require an infinite descerning power, contrary to the fundamental physical principles of today.« (Wang 1974: 93)

back and go on with it. If he does this he must leave a note of instructions (written down in some standard form) explaining how the work is to be continued. This note is the counterpart of the 'state of mind'. We will suppose that the computer works in such a desultory manner that he never does more than one step at a sitting. The note of instructions must enable him to carry out one step and write the next note. Thus the state of progress of the computation at any stage is completely determined by the note of instructions and the symbols on the tape.« (Turing 1936: 139f.)

Bei dieser zweiten Variante ist der Algorithmus nicht intern gespeichert, nicht in der Maschine selbst 'inkorporiert', sondern er ist schriftlich formuliert und von seinem jeweiligen Träger abgelöst. Beide Modellierungen sind jedoch funktional äquivalent, und sie sind bezogen auf den 'wirklichen' Computer auch komplementär (vgl. Kap. 7). Was als 'hardware' realisiert ist, kann bis zu einem gewissen Grade auch programmiert werden und umgekehrt. Eindeutiger noch, als es bei der Zustandsvariante der Fall ist, wird der Mensch bei dieser Instruktionsvariante auf eine Maschine reduziert, die ohne zu denken Anweisungen befolgt – auf eine »Papiermaschine«, wie Turing den Menschen bisweilen auch zu nennen pflegte: »It is possible to produce the effect of a computing machine by writing down a set of rules of procedure and asking a man to carry them out. Such a combination of a man with written instructions will be called a 'Paper Machine'. A man provided with paper, pencil, and rubber, and subject to strict discipline, is in effect a universal machine.« (Turing 1948: 9) Was Turing in seinem Aufsatz am Beispiel des Rechnens exemplifiziert – die Zerlegung komplexer Prozesse in elementare Operationen, mechanisches Befolgen von Instruktionen –, das ließ sich zu dieser Zeit auch in anderen Handlungsbereichen beobachten, und ich denke, genau das hat Turing auch getan (vgl. Kap. 4).

Rechnen – und formale Symboloperation überhaupt – ist also bei Turing ein vollkommen determinierter Prozeß, der sich aus einfachsten Elementen zusammensetzt. Was der menschliche 'computer' bei jedem Schritt tut, ist entweder durch seinen mentalen Zustand determiniert oder durch die Anweisung, die ihm gerade gegeben wird.[36] Was als komple-

---

36 Diese Determiniertheit, und damit auch: Vorhersagbarkeit, gilt nur für die einzelnen Grundoperationen, *nicht* aber für das Gesamtverhalten. Denn der Unentscheidbarkeitsbeweis von Turing bestand ja gerade darin zu zeigen, daß das Gesamtverhalten der Maschine unter bestimmten Bedingungen nicht vorhersagbar ist – so wenig vorhersagbar wie das menschliche Verhalten. Damit hatte Turing ein Problem gelöst,

xer Prozeß erscheinen mag, läßt sich, so Turing, aufspalten in einfachste Grundoperationen, in mentale Handgriffe sozusagen, die dann sequentiell aneinandergereiht wieder ein Ganzes ergeben. »Let us imagine the operations performed by the computer to be split up into 'simple operations' which are so elementary that it is not easy to imagine them further divided. Every such operation consists of some change of the physical system consisting of the computer and his tape (...) We may suppose that in a simple operation not more than one symbol is altered. Any other changes can be split up into simple changes of this kind«. Und er beschließt diese Ausführungen mit dem reichlich lapidaren Satz: »We may now construct a machine to do the work of this computer.« (Turing 1936: 136f.).

Turing entwickelte also zunächst einmal ein Modell algorithmischen Vorgehens, das den menschlichen 'computer' als regelbefolgende Maschine konzipierte, und zeigte anschließend, daß man sich eine Maschine vorstellen kann, die im Prinzip genau gleich vorgeht wie ein Mensch, der einer Vorschrift folgt. Die Turingmaschine ist, anders formuliert, nichts anderes als eine normierte Darstellung des Verhaltens eines menschlichen Rechners – »a codification of his analysis of calculation by humans«, wie Robin Gandy schreibt (Gandy 1988: 83f.). Ebenso wie Turings menschlicher 'computer' nimmt die Maschine Zeichen wahr, überschreibt sie oder löscht sie, und ebenso wie er kann sie verschiedene, aber nur endlich viele Zustände einnehmen. Je nachdem in welchem Zustand sie sich befindet, verhält sie sich in derselben Situation anders. Auch darin unterscheidet sie sich nicht von Turings menschlichem 'computer'.

Was Menschen tun, wenn sie einer Regel folgen, das kann auch eine Maschine tun – dies ist das Fazit von Turings Begründungsversuch, und insofern deckt seine Maschinendefinition tatsächlich alles ab, was als algorithmischer Prozeß, als »'rule of the thumb' or 'purely mechanical'« beschreibbar ist. Turings Argumentation hat, natürlich, keinen Beweischarakter, sondern bloß plausibilisierende Funktion. Sie war, wie er es selbst formulierte, »a direct appeal to intuition« und sollte seine These stützen helfen, daß 'berechenbar' tatsächlich gleichgesetzt werden kann

---

das die klassische mechanistische Theorie des Geistes noch in beträchtliche Argumentationsnot gebracht hatte: Wie ließ sich rechtfertigen, daß man den Menschen, undurchschaubar wie er war, als Maschine betrachtete, dem Inbegriff von Regelmäßigkeit und Vorhersagbarkeit? Vgl. zu diesem Bedeutungswandel von Mechanismus und Maschine Webb 1980, insb. Kap. I und Kap. IV. 4 sowie als zusammenfassende Darstellung Webb 1983.

mit 'berechenbar durch eine Turingmaschine' (Turing 1936: 135). Diese These, die sog. *Turingthese*, läßt sich in verschiedenen Varianten formulieren, in mehr technisch oder in mehr philosophisch orientierten, aber im Prinzip laufen alle auf die gleiche Grundthese hinaus, nämlich:

$T_{Standard}$: Any function which can be calculated by a human being can be computed by a Turing machine.[37]

Eine etwas technischere Version lautet:

$T_{Math}$: Every number-theoretic function $\phi(a_1,\ldots,a_n)$ for which there is an algorithm – which is intuitively computable – is Turing computable; that is, there is a Turing machine which computes it.[38]

Und die erweiterte Version läßt sich folgendermaßen formulieren:

$T_{soft}$: Every 'precisely described' human behavior can be simulated by a Turing machine (or a suitably programmed computer).[39]

Alle drei Formulierungen stimmen in ihrem Grundgedanken überein (obschon nicht alle Mathematiker die dritte Formulierung unterschreiben würden). Turing selbst hat in seinem Aufsatz die Standardversion vertreten, sie aber später in Richtung der 'weichen' Formulierung abgeschwächt. »One of my conclusion was«, so schreibt er 1947 über seine Arbeit elf Jahre zuvor, »that the idea of a 'rule of thumb' process and a 'machine process' were synonymous« (Turing 1947: 107). Sämtliche Funktionen, die von einer menschlichen Rechnerin berechnet werden können, lassen sich auch von einer Turingmaschine berechnen - das ist der zentrale Punkt von Turings Algorithmusdefinition. Alles, wofür es eine klare Vorschrift, einen Algorithmus gibt, das kann auch von einer Maschine ausgeführt werden. Zwischen formaler Symbolmanipulation und der Operation einer Turingmaschine besteht kein prinzipieller Unterschied. Formalisierung und Mechanisierung sind bedeutungsäquivalente Begriffe.

37 Gandy 1988: 82.
38 Kleene 1988: 29.
39 Vgl. Webb 1980: 220.

Was mechanisch ausgeführt werden kann, das kann auch von einer Maschine getan werden. Dies ist, auf eine einfache Formel gebracht, der Kerngedanke von Turings Argumentation. Was auf den ersten Blick einleuchtend erscheinen mag, erweist sich jedoch bei näherem Hinsehen als gar nicht so unproblematisch. Denn plausibel ist Turings These nur dann, wenn das Befolgen eines Algorithmus tatsächlich keine Intelligenz voraussetzt. »Indeed, an effective procedure (d.h. ein Algorithmus, B.H.) is precisely one whose execution begs no question, but to develop a non-circular theory of effective human computation Turing had to face the fact that a 'human computer' does need intelligence – to follow rules formulated in a language he must *understand*.« (Webb 1980: 220) Dies aber ist ein kognitiver Akt, der ein Minimum an Intelligenz voraussetzt – und folglich eine Leistung, die sich nicht mechanisieren läßt. Um dennoch an seiner These festhalten zu können, hatte Turing also zu zeigen, daß man sich ein 'Handeln nach Vorschrift' vorstellen kann, bei dem keinerlei Intelligenz erforderlich ist, auch nicht in minimalster Form. Und genau dazu diente ihm sein psychologisches Modell: »His solution was to describe a hypothetical machine – his model of the human computer – which need only scan, print, and erase symbols on a tape along which it moves. Since these atomic tasks presuppose no intelligence, it follows that a non-circular psychology of computation is possible.« (Webb 1980: 220) Turings Lösung bestand also darin zu zeigen, daß sich regelgeleitetes menschliches Handeln in einige wenige Elementaroperationen aufspalten läßt, zu denen auch eine Maschine imstande ist: Einlesen eines Zeichens, Überschreiben, Ausradieren. Daß eine solche Zerlegung tatsächlich möglich ist, demonstrierte er über die normierte Darstellung eines Menschen, der einer Vorschrift folgt. Was Turings menschlicher 'computer' tut, setzt keinerlei Intelligenz voraus. Der Mensch, der rechnet, oder allgemein einem Algorithmus folgt, unterscheidet sich in seinem Verhalten in nichts von einer Maschine – und genau deshalb kann sie ihn auch ersetzen: »We may now construct a machine to do the work of this computer.« (Turing 1936: 137)[40]

Turing bezog sich zwar in seiner Arbeit auf den Vorgang des Rechnens, implizit lag aber seiner Argumentation die Annahme zugrunde, daß sich Denken überhaupt, und nicht bloß Rechnen, als ein

40 Wie die Debatte um die Künstliche Intelligenz zeigt, hat Turing damit allerdings nicht alle Vorbehalte entkräftet. Das Problem, daß man eine Anweisung zuerst verstehen muß, bevor man sie befolgen kann, ist nach wie vor ein zentraler Einwand (vgl. auch Kap. 8).

formaler Prozeß beschreiben läßt, als eine regelgeleitete und schrittweise Umbildung von bedeutungsfreien Symbolen.[41] Diese Annahme war freilich nicht unbedingt neu. Die These, daß sich Denken als formale Symbolmanipulation beschreiben läßt, hatte schon, als einer der ersten, Thomas Hobbes (1588 – 1679) aufgestellt. »Vernunft ist Rechnen«, schrieb er in seinem *Leviathan*, »das heißt Addieren und Subtrahieren mit den Folgen aus den allgemeinen Namen (den Wörtern, B.H.), auf die man sich zum Kennzeichnen und Anzeigen unserer Gedanken geeinigt hat (...) Kurz: Wo Addition und Subtraktion am Platze sind, da ist auch Vernunft am Platze, und wo sie nicht am Platze sind, da hat Vernunft überhaupt nichts zu suchen.« (Hobbes 1984: 32)[42]

Was bei Hobbes erst in Form einer intuitiven Idee vorlag, die Vorstellung nämlich, daß Denken und Rechnen strukturanaloge Prozesse sind, die sich beide gleichermaßen als formale Symbolmanipulation beschreiben lassen, dieser Idee hat Turing eine neue Grundlage gegeben, und sie ist es, die heute als theoretisches Fundament der (klassischen) *Cognitive Science* zugrundeliegt. Mit seinem psychologischen Modell knüpfte Turing an Vorstellungen an, wie sie von der klassischen mechanistischen Theorie des Geistes formuliert worden waren, er ging aber in entscheidender Hinsicht darüber hinaus. Zu den Zusatzannahmen, die Turing einführte, gehört (1) das Konzept des 'mentalen Zustands'; (2) die Vorstellung, daß die einzelnen Denkoperationen vollkommen determiniert sind durch den jeweiligen mentalen Zustand, in dem sich ein Mensch befindet, und seinem Wahrnehmungsinput in diesem Moment; und schließlich (3) die These, daß jeder regelgeleitete formale Prozeß auch

41 Das zeigt sich vor allem auch in seinen späteren Arbeiten und am deutlichsten in seinem berühmten Aufsatz *Computing machinery and intelligence* (Turing 1950). Ich komme darauf in Kapitel 8 ausführlich zurück.

42 Damit hatte Hobbes den Grundgedanken einer mechanistischen Theorie des Geistes formuliert, die im Gegensatz zur Variante, wie sie etwa Julien Offray de la Mettrie vertrat, den menschlichen Geist als *logische* Maschine konzipierte; vgl. dazu ausführlicher Webb 1980, insb. Kap. I. Wesentliche Fragen blieben bei Hobbes jedoch noch ungeklärt. Offen war z.B. (1) ob sich tatsächlich alles Rechnen auf die beiden genannten Grundrechenarten reduzieren läßt; ob man (2) logisches Denken wirklich mit Rechnen (im Hobbesschen Sinn) gleichsetzen kann, und schließlich (3) die Frage, in welcher Beziehung Hobbes' logischer Mechanismus zum mechanistischen Modell im Bereich des Physiologischen steht. Dieser dritte Punkt ist das klassische Leib-Seele-Problem, das der Cognitive Science nach wie vor beträchtlich zu schaffen macht. Was bei Hobbes noch einigermaßen naiv formuliert war, wurde von Leibniz etwas später in eine deutlich systematischere Form gebracht. Die Basis dafür war die Idee des Kalküls, die damals, und anderem auch von Leibniz selbst, entwickelt worden war; vgl. dazu ausführlicher Krämer 1988, insb. Kap. 2.2.

von einer Maschine ausgeführt werden kann, die im Prinzip genau gleich vorgeht wie ein Mensch, der einer Vorschrift folgt.[43]

Wenn aber eine Turingmaschine in Prinzip genau gleich funktioniert wie ein Mensch und zu denselben Leistungen fähig ist wie er, dann liegt auch der Umkehrschluß nahe, die These nämlich, daß die Turingmaschine ein Modell abgibt zur Beschreibung menschlicher Denkprozesse – »that mental processes are correctly described in the logical model independently of the particular physical embodiment« (Hodges 1988: 9). Diese 'funktionalistische' Perspektive, die heute als Grundaxiom der Cognitive Science gilt, ist in Turings Aufsatz von 1936 implizit bereits angelegt. Zwischen Mensch und Maschine besteht ein Unterschied nur in stofflicher Hinsicht: »A man provided with paper, pencil, and rubber, and subject to strict discipline, is in effect a universal machine.« (Turing 1948: 9) Damit hat Turing letztlich zwei (psychologische) Thesen formuliert, die zwar zusammengehören, aber analytisch klar voneinander abzugrenzen sind – »the thesis (M) that man *is* a universal Turing machine, and the thesis (C) of artificial intelligence that all of man's precisely describable behavior can be *simulated* (by a Turing machine)« (Webb 1980: 235). Beide Thesen haben zwei entscheidende Implikationen:

(1) Kognitive Prozesse lassen sich wissenschaftlich beschreiben ohne Bezugnahme auf ihr physisches Substrat. Turing hat dem Mechanismus eine neue *Beschreibungsebene* gegeben – eine logische bzw. eine algorithmische – und damit weiterentwickelt, was Thomas Hobbes, freilich noch sehr vage, im Sinne gehabt hatte: »that thought itself is some kind of mechanical process« (Webb 1980: 19; Gandy 1988: 87). Mit seinem Maschinenmodell hat Turing vorgeführt, daß eine mentalistische und eine mechanistische Position nicht prinzipiell unvereinbar sind. »The problem of mind is the key to *Computable Numbers*. Somehow, it would appear, Turing sensed in the questions about definite, mechanical methods an opportunity to abstract and refine the notion of being determined, and

43 Was Turing als 'state of mind' bezeichnet, aber nicht weiter erläutert hatte, wurde dann in der 'klassischen' Cognitive Science, so wie sie etwa von Jerry Fodor, Zenon W. Pylyshyn und dem frühen Hilary Putnam vertreten wird, weiterentwickelt. Da Turing sein Modell am Beispiel eines Menschen entwickelt, der rechnet, ist der Wahrnehmungsinput bei ihm auf (mathematische) Zeichen beschränkt. Um Turings Modell nutzbar zu machen für die Beschreibung von mentalen Prozessen, die sich nicht bereits von vornherein in einer Welt von bedeutungsfreien Zeichen abspielen, muß eine Zusatzannahme getroffen werden, nämlich die, daß alles 'Inhaltliche' im menschlichen Kopf formal codiert ist – im Medium einer 'language of thought', wie Jerry Fodor behauptet (vgl. u.a. Fodor 1987). Diese Annahme ist, selbstverständlich, nicht unbestritten geblieben.

apply this newly refined concept to the old question of mind. Somehow he perceived a link between what to anyone else would have appeared the quite unrelated questions of the foundations of mathematics, and the physical description of mind. The link was a scientific, rather than a philosophical view; what he arrived at was a new materialism, a new level of description based on the idea of discrete states, and an argument that this level (rather than that of atoms or electrons, or indeed that of the physiology of the brain tissue) was the correct one to couch the description of mental phenomena.« (Hodges 1988: 6)[44]

(2) Damit verbunden ist eine zweite Überlegung, die sich im Zusammenhang mit der Erfindung des 'wirklichen' Computers als einigermaßen brisant erweisen sollte: die Annahme nämlich, daß Denken nicht an ein bestimmtes materielles Substrat gebunden ist, an das Gehirn zum Beispiel. »Mental processes are correctly described in the logical model independently of the particular physical embodiment, and so can be embodied in a physical form other than the brain«, wie Andrew Hodges diese Annahme formuliert (Hodges 1988: 9).[45] Mentale Prozesse können in unterschiedlichen physikalischen Medien realisiert werden, im menschlichen Gehirn oder in der Hardware eines Computers. Die physikalische Beschaffenheit, der 'stuff', hat keine kausale Wirkung. Was Turing in seinem Aufsatz postulierte, wenn auch noch in wenig elaborierter Form, war eine Antwort auf das Leib-Seele-Problem, die man heute als *Funktionalismus* bezeichnet und die ihren deftigsten Ausdruck in Hilary Putnams

---

44 Damit einher geht ein Bedeutungswandel des Begriffs des 'Mechanischen'. Mechanisch, maschinenmäßig ist in dieser Sicht etwas, was nach einer klaren Vorschrift abläuft, unabhängig davon wie es praktisch-physikalisch realisiert ist. Das heißt: 'Maschine' wird nicht (mehr) über ihre physikalisch-stoffliche Beschaffenheit definiert, sondern über das Vorhandensein einer klar definierten Vorschrift, d.h. über den Begriff des Algorithmus. Wie die physikalische Realisierung im einzelnen aussieht, ist – theoretisch gesehen – irrelevant. Dieser neue 'algorithmische' Maschinenbegriff ist vor allem auch für die Techniksoziologie von Bedeutung. Ich komme in Kapitel 7 darauf zurück.

45 Andrew Hodges führt Turings Idee, daß Intelligenz in verschiedenen physikalischen Medien realisiert sein kann, auf den Tod seines Jugendfreundes Christopher Morcom zurück, über den er sich (Turing war damals 15 Jahre alt) mit einer Art Reinkarnationstheorie hinwegtröstete: »When the body dies«, schrieb er Christophers Mutter tröstend, »the 'mechanism' of the body holding the spirit is gone and the spirit finds a new body sooner or later perhaps immediately.« (Hodges 1988: 6) Die Argumente, die Andrew Hodges in seiner Biographie benützt, um Turings Denken zu erklären, sind vor allem psychologischer Natur. Daß sich diese psychologische Erklärungsstrategie durch eine eher soziologisch ausgerichtete zumindest ergänzen läßt, versuche ich in Kapitel 4 zu zeigen.

Diktum findet: »We could be made of Swiss cheese, and it wouldn't matter.« (Putnam 1975a: 291)

## 4. Zusammenfassung: Geist und Mechanismus

> Denken verdinglicht sich zu einem selbsttätig ablaufenden, automatischen Prozeß, der Maschine nacheifernd, die er selber hervorbringt, damit sie ihn schließlich ersetzen kann.
>
> *Max Horkheimer/Theodor W. Adorno*[46]

Das Problem, mit dem sich Alan Turing Mitte der 30er Jahre befaßte, war an sich ein eng mathematisches. Die Art und Weise aber, wie er es löste, hatte (und hat) Implikationen, die über die Mathematik weit hinausreichen. Turings Leistung war eine mehrfache, und sie hat Bedeutung auch für die Soziologie. Ich möchte deshalb im folgenden die Grundzüge seiner Argumentation noch einmal kurz darstellen und zu verdeutlichen versuchen, was ihre Implikationen sind, auch außerhalb der Mathematik.

(1) Ausgangspunkt für Turings Überlegungen war die Hilbertsche Frage, ob es ein allgemeines Verfahren gibt, mit dem man für jede beliebige Formel entscheiden kann, ob sie gültig ist oder nicht. Dazu mußte jedoch zunächst einmal geklärt werden, was unter einem 'allgemeinen Verfahren' genau zu verstehen ist. Turing war damals nicht der einzige, der sich um eine Präzisierung des Algorithmusbegriffes bemühte, aber er war (abgesehen von Emil Post, auf den ich später noch zu sprechen kommen werde), der einzige, der bei der letztlich psychologischen Frage ansetzte: Was tut ein *Mensch*, der einer Vorschrift folgt?

(2) Was tut ein Mensch, der einer Vorschrift folgt? Er geht, so Turings Antwort, mechanisch vor, Schritt für Schritt – wie eine Maschine. »Turing seized upon the idea that the very nature of a definite method was that it had to be applied mechanically« (Hodges 1988: 4), und er radikalisierte diese Vorstellung zur Idee einer Maschine: »We may take this statement literally, understanding by a purely mechanical process one which could be carried out by a machine.« (Turing 1939: 160) Ausgangspunkt für Turings Algorithmusdefinition ist also ein Mensch, der mechanisch einer Vorschrift folgt, Schritt für Schritt, ohne zu denken – wie eine Maschine. Dieses *Handeln nach Vorschrift* hat Turing mit seinem psychologischen Modell in eine normierte Form gebracht und es

46 Horkheimer/Adorno 1944: 26.

anschließend verdichtet zur Vorstellung einer Maschine, die sich auf einem Band hin- und herbewegt und Zeichen löscht bzw. sie überschreibt. Turings idealisierter 'Rechner' und die Maschine, die er anschließend einführt, sind im Prinzip austauschbar.

(3) Die *Turingthese* beruht auf der Annahme, daß formale Symbolmanipulation und die Operationsweise einer Turingmaschine äquivalente Prozesse sind. Um diese These zu plausibilisieren, hat Turing den Vorgang der Symbolmanipulation in Elementaroperationen zerlegt, die so einfach sind, daß sogar eine Maschine dazu imstande ist: Einlesen von Zeichen, Löschen, Beschriften, Bewegung nach rechts, Bewegung nach links. »What Turing also did was to show that calculation can be broken down into the iteration (controlled by a 'program') of extremely simple concrete operations; so concrete that they can be easily described in terms of (physical) mechanism.« (Gandy 1988: 101) Die 'Maschine' selbst, die Apparatur, die Turing entwarf, hat dabei nur veranschaulichende Funktion. Denn was eine Turingmaschine tut, welche Operationen sie ausführt, je nachdem auf welches Symbol sie stößt und in welchem Zustand sie sich befindet, läßt sich auch in Form einer zweidimensionalen Matrix darstellen. Durch eine solche Verhaltenstabelle – oder 'Maschinentafel', wie man sie heute nennt – ist eine Turingmaschine vollständig definiert. So gesehen *ist* die Maschinentafel die Turingmaschine. Auf welche Weise die Rechnung effektiv ausgeführt wird, durch welche Apparatur, ist nicht von Belang. Was als 'Turingmaschine' bezeichnet (und zu Unrecht oft rein technisch beschrieben wird), ist also in Wahrheit ein formaler mathematischer Begriff. Die Turingtafel ist nichts anderes als eine spezifische Form der Darstellung eines Algorithmus.

(4) Eine Funktion heißt *Turing-berechenbar*, wenn es einen Algorithmus gibt, der durch eine Turingtafel beschrieben und von einer Turingmaschine abgearbeitet werden kann, indem sie sich auf dem Band hin- und herbewegt und schrittweise eine gegebene Ausgangskonfiguration in eine Endkonfiguration (den Funktionswert) umwandelt. Die Turing-berechenbaren Funktionen umfassen, anders formuliert, »sämtliche Funktionen, die nach allem Ermessen von irgendeinem endlichen (menschlichen, B.H.) Rechner berechnet werden können« (Stegmüller 1959: 47).

(5) Mit seiner Maschinendefinition hat Turing dem intuitiven Algorithmusbegriff eine mathematisch präzise Definition gegeben und damit gleichzeitig, wie Kurt Gödel rückblickend schrieb, »a precise and unquestionably adequate definition of the general concept of a formal system« geliefert. »Turing's work gives an analysis of the concept of 'mechanical

procedure' (alias 'algorithm' or 'computation procedure' or 'finite combinatorial procedure'). This concept is shown to be equivalent with that of a 'Turing machine'. A formal system can simply be defined to be any mechanical procedure for producing formulas, called provable formulas.« (Gödel 1964: 71f.) Mit seiner Arbeit hat Turing die formalistische Auffassung der Mathematik zu Ende gedacht und sie gleichzeitig radikalisiert: Jede Operation im Rahmen eines formalen Systems läßt sich im Prinzip auch von einer Turingmaschine ausführen.

(6) Was formalisierbar ist, das ist zwar, wie Turing gezeigt hatte, auch mechanisierbar, aber nicht alles, was inhaltlich einsehbar ist, läßt sich auch in ein formales System überführen. Dies ist das Fazit aus Gödels Unvollständigkeitsbeweis, und mit seinem 'Halteproblem' bewies Turing, wie er es selbst später formulierte, »that with certain logical systems there can be no machine which will distinguish provable formulae of the system from unprovable, i.e. that there is no test that the machine can apply which will divide propositions with certainty into these two classes.« (Turing 1947: 123) Damit war erwiesen, daß das Hilbertprogramm, so wie es Hilbert ursprünglich formuliert hatte, nicht durchführbar ist. Turing konnte zwar zeigen, daß sich ein formales System tatsächlich als eine 'Maschine' denken läßt, die alle beweisbaren Sätze mechanisch zu erzeugen imstande ist, aber er hatte gleichzeitig auch bewiesen, daß es Probleme gab, die von keiner Maschine berechnet werden konnten (allerdings ebensowenig von einem Menschen).

(7) Mit seiner Arbeit hat Turing zusammengeführt, was in Hilberts Arbeiten, verstreut allerdings, bereits angelegt war. Vieles von dem, was Turing zu einer integralen Sicht gebündelt hat, angeordnet um den Schlüsselbegriff der 'Maschine', hatte Hilbert bereits vorgedacht. Das Betreiben von Mathematik – und systematisches Denken überhaupt – ist für Hilbert ein Handeln nach Regeln, ein formales Operieren mit Symbolen. »Die Grundidee meiner Beweistheorie ist nichts anderes«, schrieb er 1928, »als die Tätigkeit unseres Verstandes zu beschreiben, ein Protokoll über die Regeln aufzunehmen, nach denen unser Denken tatsächlich verfährt. Das Denken geschieht eben parallel dem Sprechen und Schreiben, durch Bildung und Aneinanderreihung von Sätzen.« (Hilbert 1928, zit. in Mehrtens 1990: 292) Was Hilbert hier nur am Rande vermerkt, daß nämlich, wie er an anderer Stelle formulierte, »unser Verstand keinerlei geheimnisvolle Künste treibt, vielmehr nur nach ganz bestimmten aufstellbaren Regeln verfährt« (Hilbert 1930b: 19), diese Vorstellung hat Turing

aufgegriffen und im Rahmen seines psychologischen Modells systematisiert und in eine normierte Form gebracht.

Bereits Hilbert hat die ehemals idealen Objekte der Mathematik auf profane Zeichen reduziert und der Tätigkeit des Mathematikers den trivialen Sinn von 'Arbeit' gegeben. Aus der Perspektive des Formalismus gleicht das Betreiben von Mathematik einem mechanischen Operieren an und mit diesen Zeichen. Nicht irgendwelche transzendenten Objekte und auch nicht die konstruktiven Schöpfungen des menschlichen Geistes bilden die Gegenstände der Mathematik, sondern physikalisch realisierte Zeichen, banale Tintenstriche auf dem Papier. Hermann Weyl hat diese 'Profanisierung' der Mathematik, die bei Turing dann in ein Denken mündet, das man damals tatsächlich als »schockierend industriell« empfinden mochte (Hodges 1989: 127), mit der Arbeit eines Handwerkers vergleichen: »Da geht der Mathematiker nicht viel anders mit seinen aus Zeichen gebauten Formeln um wie der Tischler in seiner Werkstatt mit Holz und Hobel, Säge und Leim.« (Weyl 1971: 23) Diese Zusammenführung von Mathematik und Handwerk mochte schon bei Hilbert anachronistisch gewesen sein. Turing jedenfalls hat dem mathematischen Formalismus endgültig eine 'industrielle' Wendung gegeben: Hilberts Tintenstriche werden zu Markierungen auf einem Maschinenband, und aus Hilberts mechanischem »Handeln nach Regeln« macht Turing eine maschinelle Operation (vgl. auch Kap. 4).

(8) Obschon sich Turing in seiner Argumentation ausschließlich auf die Mathematik bezog, reichen seine Überlegungen in ihrer Bedeutung weit über sie hinaus. Mit seinen beiden Thesen hat er die theoretische Grundlage gelegt für zwei neue Disziplinen, für die Theoretische Informatik und für die Cognitive Science, und mit seinem Maschinenmodell hat er, einige Jahre bevor der 'wirkliche' Computer erfunden wurde, das logische Grundprinzip von Digitalcomputern vorweggenommen.

(a) Sämtliche Funktionen, die von einem menschlichen Rechner berechnet werden können, lassen sich auch von einer Turingmaschine berechnen. Das ist die sog. *Turingthese*, die in einer erweiterten Version als Prämisse der Künstlichen Intelligenz zugrunde liegt: »Every 'precisely described' human behavior can be simulated by a suitably programmed computer.« (Webb 1980: 220) Turing hat diese erweiterte Version seiner These bereits sehr früh vertreten, einige Jahre bevor die Künstliche Intelligenz überhaupt ihren Namen bekam. »Ich verfechte die Behauptung«, verkündete er in einem Vortrag von 1951, »daß Maschinen konstruiert werden können, die das Verhalten des menschlichen Geistes weitestgehend simulieren.« (Turing 1951: 10) Um die Möglichkeiten (und Grenzen) von Digitalcomputern abschätzen zu können, brauchte er seine am mathematischen Modell gewonnenen Überlegungen bloß auf die neuen Maschinen zu übertragen. »The idea behind digital computers may be explained by saying that these machines are intended to carry out operations which could be done by a human computer. The human computer is supposed to be following fixed rules; he has no authority to deviate from them in any detail. We may suppose that these rules are supplied in a book, which is altered whenever he is put on to a new job (...) The book of rules which we have described our human computer as using is of course a convenient fiction. Actual human computers really remember what they have got to do. If one wants to make a machine mimic the behavior of the human computer in some complex operation one has to ask him how it is done, and then translate the answer into the form of an instruction table. Constructing instruction tables is usually described as 'programming'.« (Turing 1950: 8f.) Was Turing hier so locker hinschreibt – »one has to ask him how it is done« –, ist allerdings auch bloß eine 'convenient fiction'. Denn Simulation setzt voraus, daß die Menschen, die simuliert werden, genau wissen, was sie tun und wie sie es tun, und dieses Wissen auch verbalisieren können.[47]

Umgekehrt läßt sich einwenden, daß wir etwas erst wirklich verstanden haben, wenn wir es auch *formulieren* können – und genau in diesem Fall ist es auch mechanisierbar geworden. Zu dieser – von ihm allerdings keineswegs gewollten Schlußfolgerung – gelangte jedenfalls Emil Post, als er nachzuweisen versuchte, daß der Mensch der Maschine kognitiv immer überlegen sein werde (Webb 1980: 229; Gandy 1988: 92ff.). Ausgangspunkt seiner Überlegungen, die er in den 20er Jahren in seinem Tagebuch notierte (sie wurden jedoch erst 1965 veröffentlicht), war die anti-mechanistische Prämisse, daß eine Maschine nie zu denselben (geistigen) Leistungen imstande sein wird wie ein Mensch (Post 1965).[48] Entsprechend stellte sich ihm die Aufgabe zu zeigen, worin genau die Differenz zwischen Mensch und Maschine besteht: »What we must now

---

47 Turing hat im selben Aufsatz noch eine andere, radikalere Konzeption der Wissenaquisition vorgeschlagen. Er stellte sich nämlich eine Maschine vor, eine 'child-machine', wie er sie nannte, die mit Sensoren ausgestattet und dadurch in der Lage ist, eigene Erfahrungen zu machen. Eine solche 'child-machine' braucht nicht mehr programmiert zu werden. Ich komme in Kapitel 8 darauf zurück.

48 In der Formulierung von Post: »We see that a *machine* would never give a complete logic; for once the machine is made *we* could prove a theorem it does not prove.« (Post 1965: 417)

do is to isolate the creative germ in the thinking process.« (Post 1965: 423) Anstatt aber beweisen zu können, daß dem menschlichen Denken etwas eigen ist, das sich niemals vollständig mechanisieren läßt, führten ihn seine Überlegungen zu einem ganz anderen Schluß: »The conclusion that man is not a machine is invalid.« (Post 1965: 423)

Das menschliche Denken vollzieht sich, so Post, über weite Strecken nicht nach mechanischen Regeln, es ist kreativ und verläuft zu einem großen Teil unbewußt. In einem rationalen Sinn *verstanden* haben wir ein Problem jedoch erst dann, wenn es uns bewußt ist und wir es auch formulieren können. Nur – und dies ist die Schwierigkeit, in die jede antimechanistische Argumentation unweigerlich gerät – ist es genau dann auch *mechanisierbar* geworden. »Now it seems that this complete seeing is a complicated process mostly subconscious. But it is not given till it is made completely conscious. But then it ought be constructable purely mechanically.« (Post 1965: 423) Der Mensch hat seine Überlegenheit aufgrund eines Denkens zu beweisen, das nicht 'mechanisch' ist. Nur: Sobald man dieses Denken reflektierend beschreibt, scheint es auch simulierbar zu werden. Genau diesen Zusammenhang hat Alan Turing in seiner These formuliert. Die These selbst gleicht der Geschichte vom Igel und dem Hasen. Dem Denken, das sich selbst reflektiert, schaut immer schon seine Simulation entgegen.

(b) Turing hat in seinem Aufsatz, etwas weniger explizit vielleicht, noch eine zweite These formuliert: die These nämlich, daß die Turingmaschine ein Modell abgibt für die Analyse menschlicher Denkprozesse – »that man *is* a universal Turing machine« (Webb 1980: 235).[49] Was Turing in seinem Aufsatz skizziert, aber nicht weiter ausgearbeitet hatte – die Idee des 'mentalen Zustandes' wie auch die Vorstellung, daß sich mentale Prozesse beschreiben lassen ohne Bezugnahme auf ihr physisches Substrat –, dies wurde später von der Cognitive Science aufgegriffen und weiter ausgebaut. Beide Thesen sind jedoch analytisch voneinander zu unterscheiden. Die These, daß jedes regelgeleitete menschliche Verhalten auf einer Turingmaschine simulierbar ist, impliziert noch lange nicht den Umkehrschluß, die Annahme nämlich, daß sich alles menschliches Denken als formale Symboloperation beschreiben läßt. Und umgekehrt: Auch wenn dem so wäre, so ist damit die Realisierbarkeit 'künstlicher' Intelligenz noch keineswegs garantiert (Webb 1983: 310ff.).

49 Oder in den Worten von Andrew Hodges: »Alan Turing offered an answer, a thesis: the identification of the world of Mind with that of the discrete state machine.« (Hodges 1988: 13)

(c) Eine Turingmaschine ist eine abstrakte Maschine. Turing macht nirgendwo Aussagen darüber, wie die Zustände, die mentalen oder maschinellen, physikalisch realisiert sind. »The 'logical description' of a Turing machine does not include any specification of the *physical nature* of these 'states' – or indeed, of the physical nature of the whole machine. (Shall it consist of electronic relays, of cardboards, of human clercs sitting at desks, or what?) In other words, a given 'Turing machine' is an *abstract* machine which may be physically realized in an almost infinite number of different ways.« (Putnam 1975b: 371) Turing hat der mechanistischen Theorie des Geistes eine neue Beschreibungsebene gegeben – eine logische bzw. eine algorithmische. In einer Zeit, in der der Behaviorismus noch praktisch unangefochten herrschte, hat Turing gezeigt, daß Mentalismus und Mechanismus nicht unvereinbar sind. Kognitive Prozesse lassen sich unabhängig von ihrem physikalischen Substrat beschreiben und können trotzdem im Rahmen eines mechanistisch-deterministischen Modells konzeptualisiert werden.

(d) Damit hat Turing eine Position vorformuliert, die man heute als *Funktionalismus* bezeichnet (S. 255ff.). Auf die klassisch-cartesische Frage – »Are we made of matter or of soul-stuff?« – gibt der Funktionalismus eine dritte Antwort, die Hilary Putnam (er hat dem Turing-Funktionalismus die philosophischen Weihen gegeben, sich aber später merklich von ihm distanziert), folgendermaßen formuliert:

»Dem Funktionalisten zufolge hat das Gehirn Eigenschaften, die in gewissem Sinne nicht physikalische sind (...) Ich meine Eigenschaften, die in Begriffen, die den physikalischen oder chemischen Aufbau des Gehirns unerwähnt lassen, definiert werden können. Falls es seltsam scheint, daß ein physikalisches System nicht-physikalische Eigenschaften haben soll, denke man an eine Rechenmaschine. Eine Rechenmaschine hat viele physikalische Eigenschaften. Sie hat z.B. ein bestimmtes Gewicht, und sie hat eine bestimmte Anzahl von Schaltelementen o. dgl. Sie hat ökonomische Eigenschaften, wie z.B. einen bestimmten Preis, und sie besitzt auch funktionale Eigenschaften, wie z.B. ein bestimmtes Programm. Diese letztere Art von Eigenschaften ist nicht-physikalisch in dem Sinne, daß ein System sie unabhängig von seiner sozusagen metaphysischen oder ontologischen Zusammensetzung zeitigen kann. Es könnte sein, daß ein körperloser Geist, ein Gehirn und eine Maschine je ein bestimmtes Programm aufweisen und daß der funktionale Aufbau dieser drei Programme – des körperlosen Geistes, des Gehirns und der Maschine – genau gleich wären, obwohl ihre Materie – ihr Stoff völlig verschieden ist.« (Putnam 1990: 111)

Am Geist »ist nichts wesentlich Biologisches« – das ist, von John R. Searle kritisch vermerkt (Searle 1986: 27), die Grundhaltung des Funktionalismus in Hinblick auf das Leib-Seele-Problem. Diese Auffassung hat Folgen für die Selbsteinschätzung der Künstlichen Intelligenz: Wenn am Geist nichts wesentlich Biologisches ist, dann lassen sich kognitive Prozesse im Prinzip auch in anderen physikalischen Systemen realisieren. Daß die Stofflichkeit des menschlichen Gehirns fürs Denken offenbar besonders gut geeignet ist, ist nichts weiter als eine (für uns freilich angenehme) Koinzidenz.

(e) Die Turingmaschine ist keine Maschine im physikalischen Sinn, sondern eine 'symbolische Maschine' (Krämer) – ein mathematisches Modell, das Turing einführte, um den Algorithmusbegriff zu präzisieren. 1936, als Turing seinen Aufsatz schrieb, gab es noch keine Computer, und Turing hat auch nicht an richtige Maschinen gedacht, als er sein Konzept der Turingmaschine entwickelte (Gandy 1988: 83f.). Dennoch hat er mit seinem Maschinenmodell das Grunddesign von Digitalcomputern vorweggenommen. Alle Digitalcomputer, die bislang entwickelt wurden, sind gleichermaßen gerätetechnische Realisierungen von Turingmaschinen. Denn trotz enormer Unterschiede, was ihre Bausteine und ihre Architektur anbelangt, haben sie einige Grundprinzipien gemeinsam, und es sind diese Grundprinzipien, die Turing als erster beschrieben hat (vgl. Kap. 6).

Teil 2

# Die soziale Welt der Mathematik

# Übersicht

> I study Mathematics as a product of the human mind and not as absolute.
>
> *Emil Post, Diary*[1]

Mathematik und Naturwissenschaften galten lange Zeit als Wissensgebiete, die einer wissenssoziologischen Betrachtung nicht zugänglich sind. Die positivistische Wissenschaftsphilosophie war gewissermaßen der »cordon sanitaire« (Overington), mit dem der Virus des Relativismus von den 'harten' Wissenschaften ferngehalten wurde. Das hat sich im Zuge der anti-positivistischen Wende in der Wissenschaftsphilosophie geändert. Die Arbeiten von Thomas Kuhn, Paul Feyerabend und Norwood R. Hanson, um nur die wichtigsten Exponenten der neuen Wissenschaftsphilosophie zu erwähnen, haben maßgeblich dazu beigetragen, daß die Naturwissenschaften ihren epistemologischen Sonderstatus verloren haben.

Von den 'ravages of history' (Toulmin) ist bislang offenbar nur die Mathematik verschont geblieben. Mathematisches Wissen gilt immer noch als Inbegriff von Universalität und Objektivität. In einer Zeit, in der alle Wissensgebiete, von der Psychologie bis hin zur experimentellen Physik, auf ihre sozialen Ursprünge hin befragt werden, in einer Zeit, wo der Glaube an Objektivität und Wahrheit ins Wanken geraten ist, scheint allein die Mathematik noch unanfechtbar zu sein. Die Sätze der Mathematik machen den Anschein von »Petrefakten«, schrieb Ludwig Wittgenstein, von Tatsachen aus Stein, unverrückbar und unhinterfragbar (Wittgenstein 1969: 169). Und für Karl Mannheim, den Begründer der modernen Wissenssoziologie, war die Mathematik jenes Gebiet, das sich einer wissenssoziologischen Betrachtung am augenfälligsten entzog. Die Sätze der Mathematik galten ihm als so unverrückbar, als so ewig in ihrer Wahrheit, daß er sie explizit aus seinem Programm ausschloß.

Das ist bis heute so geblieben. Wissenssoziologische Analysen, d.h. Studien, die die inhaltliche Entwicklung der Mathematik auf ihr soziales Fundament hin untersuchen, gibt es praktisch keine. Gegenüber dem »Wunder des unwiderruflichen Beweises« (Mehrtens) pflegt die Gemeinschaft der Wissenschaftshistoriker in andächtiger Ehrfurcht zu erstarren.

---

1 Post 1965: 428.

Wer wollte auch infrage stellen, daß '2 x 2 = 4' ist? Oder Zweifel anmelden an Turings Beweis der Unentscheidbarkeit der Mathematik? Die Tatsache, daß man sich in der Mathematik anscheinend immer und ohne große Probleme darauf einigen kann, ob ein Resultat – eine Rechnung oder ein Beweis – richtig ist oder falsch, und zwar unabhängig davon, wo der Einzelne steht, sozial oder ideologisch, dieser Gewißheitscharakter der Mathematik scheint ihre Universalität und Kontextfreiheit hinlänglich zu belegen. »Es kann ein Streit darüber entstehen, welches das richtige Resultat einer Rechnung ist (z.B. einer längeren Addition). Aber so ein Streit entsteht selten und ist von kurzer Dauer. Er ist, wie wir sagen, 'mit Sicherheit' zu entscheiden (...) Wäre es anders, wäre z.B. der eine überzeugt, eine Ziffer habe sich unvermerkt geändert, oder das Gedächtnis habe ihn, oder den Andern getäuscht, etc., etc., – so würde es unsern Begriff der 'mathematischen Sicherheit' nicht geben». (Wittgenstein 1953: 571)

Entsprechend begnügen sich die meisten mathematikhistorischen Arbeiten damit, die Entwicklung der Mathematik aus einer rein internalistischen Perspektive nachzuzeichnen, nicht selten in Form einer glatten Heroengeschichte. Die Entwicklung der Mathematik präsentiert sich aus dieser Sicht als ein kumulativer Prozeß, zu dem es keine Alternativen gibt. Wenn Soziales berücksichtigt wird, dann meistens reduziert auf die konventionelle wissenschaftssoziologische Frage nach den institutionellen Voraussetzungen (soziale Rekrutierung, fachliche Differenzierung etc.) mathematischer Produktion, während die Inhalte der Mathematik von einer soziologischen Betrachtung ausgeschlossen bleiben. Ähnlich wie die Wissenschaftssoziologie sich lange Zeit darauf beschränkte, die institutionellen Rahmenbedingungen und die sozialen Folgen der Naturwissenschaften zu untersuchen, nicht aber deren Inhalt und Form, gibt es zwar eine soziologisch orientierte Institutionengeschichte der Mathematik, nicht aber eine wissenssoziologisch inspirierte Ideengeschichte.

Der praktizierende Mathematiker sei in der Theorie, am Sonntag, Formalist und in der Praxis Platonist, schreiben die beiden Mathematikhistoriker Philip Davis und Reuben Hersh (Davis/Hersh 1985: 337) Der praktizierende Mathematikhistoriker scheint auch an Werktagen Platonist zu sein. Unter seinem Blick ordnet sich die Geschichte der Mathematik zu einem gradlinigen Weg hin zu den ewigen Wahrheiten. Eine wissenssoziologische Perspektive setzt im Gegensatz dazu *Kontingenz* voraus: Alles könnte im Prinzip auch anders möglich sein; das Gedachte macht immer nur einen Teil des Denkbaren aus. Nur unter einer solchen

Kontingenzannahme macht es Sinn zu fragen: Weshalb wurde dieses gedacht (und nicht jenes)? Weshalb tauchte diese Fragestellung auf (und nicht eine andere)?

Mathematik ist – wie andere Wissenschaften auch – eine Form kultureller Produktion und ebenso wie diese geprägt von den sozialen Erfahrungen und Praktiken jener, die sie betreiben. Spätestens seit den Umbrüchen in der Wissenschaftsphilosophie in den 60er Jahren weiß man, daß wissenschaftliche Entwicklung nicht als unaufhaltsamer Fortschritt der Vernunft zu qualifizieren ist, als eine sukzessive Annäherung an eine wie auch immer geartete äußere Wirklichkeit. Wissenschaftliche Entwicklung ist 'unterdeterminiert': Rein wissenschaftsinterne, d.h. rein kognitive Faktoren reichen nicht aus, um zu erklären, weshalb sich diese Theorie durchsetzte (und nicht jene), weshalb diese Vorstellung entwickelt wurden (und nicht eine andere). Was gedacht wird und sich als gesichertes Wissen durchsetzt, ist nicht allein durch den Gegenstand selbst determiniert, sondern mit beeinflußt von außerwissenschaftlichen, von sozialen Faktoren. Das ist, sehr grob formuliert, die Grundannahme einer wissenssoziologischen Betrachtung der Naturwissenschaft.

Was für die empirischen Wissenschaften gilt, müßte an sich auch für die Mathematik gelten. Nur ist das bei ihr sehr viel schwieriger auszumachen. Denn in der Mathematik mag man sich vielleicht irren, Zweifel aber gibt es nicht. »Dem mathematischen Satz ist«, wie Ludwig Wittgenstein es formuliert, »gleichsam offiziell der Stempel der Unbestreitbarkeit aufgedrückt worden.« (Wittgenstein 1969: 168) Weshalb das so ist, woher die Mathematik ihren Gewißheitscharakter bezieht, das stellt sich je nach mathematikphilosophischer Position anders dar. Während der Evidenzcharakter der Mathematik für den Empiristen z.B. in der sinnlichen Erfahrung verankert ist, liegt er für den Platonisten in der Übereinstimmung mit einer Sphäre ewiger mathematischer Wahrheiten begründet. Auf welche Position auch immer man sich bezieht, ob ich mich als Empiristin verstehe oder als Platonistin, als Intuitionistin oder als Formalistin, in keinem Fall wird der Absolutheitscharakter der Mathematik angezweifelt oder als einer soziologischen Erklärung bedürftig erachtet.

Weshalb es so schwer fällt, das Tun der Mathematiker auf den sozialen Kontext zu beziehen, in dem sie leben, das hat seinen Grund aber auch im formalen Charakter der modernen Mathematik. Die formalistische Mathematik, so wie sie David Hilbert zu Beginn dieses Jahrhunderts entwickelt hat, ist eine hermetisch abgeschlossene, eine rein syntaktische

Welt. Eine Welt, in der die Zeichen nur noch auf sich selbst verweisen und nicht mehr *für* etwas stehen. Wie soll unter diesen Bedingungen ein Zusammenhang hergestellt werden zwischen der Syntax der Mathematik und der Semantik des sozialen Lebens? Wie sollen sich in dieser rein formalen Welt noch Spuren des Sozialen finden lassen? Die Mathematik sei der einzige Wissenstypus, bei dem die »Genesis nicht in das Denkergebnis eingeht«, schrieb Karl Mannheim zur selben Zeit, als sich der Formalismus als herrschende Auffassung etablierte. Sie sei das einzige Wissensgebiet, das unberührt geblieben sei von den »Spuren menschlicher Herkunft« (Mannheim 1931: 251; 256). Dennoch lassen sich die »Spuren menschlicher Herkunft«, die Mannheim überall aufzufinden glaubte, nur nicht in der Mathematik, auch dort mitunter erahnen. Dies versuche ich im vorliegenden zweiten Teil dieser Arbeit an zwei Beispielen aufzuzeigen.

In Teil 1 habe ich Turings Arbeit auf den innermathematischen Kontext bezogen, in dem sie entstanden ist. Von einer internalistischen Position aus betrachtet ist Turings Argumentation eine konsequente Weiterführung von Ideen, die im Hilbertschen Formalismus bereits angelegt waren – eine weitere Variante der Geschichte von den Zwergen, die auf den Schultern von Riesen stehen. Ohne bestreiten zu wollen, daß die Entwicklung der formalistischen Auffassung der Mathematik und ihre Zuspitzung in Turings Maschinenmodell eine innermathematische Eigenlogik hat, scheint mir die Richtung, die die Mathematik damals nahm, aber auch von ihrem sozialen und kulturellen Umfeld beeinflußt gewesen zu sein. Dies versuche ich in Kapitel 4 zu plausibilisieren.

Der Formalismus ist neben dem intuitionistischen und logizistischen Programm eine der drei Antworten auf die Widersprüche, die man um die Jahrhundertwende in der Mathematik entdeckt hatte. So sieht es zumindest die konventionelle Geschichte der sog. Grundlagenkrise. Wie neuere mathematikhistorische Arbeiten jedoch zeigen, waren die Widersprüche, die man entdeckt hatte, nicht von Anfang an und nicht für alle ein gravierendes Problem. Sie wurden erst allmählich als ein solches interpretiert, um dann in den frühen 20er Jahren, zu einer Zeit also, als nicht nur die Mathematik geprägt war von Krisenbewußtsein und Desorientierung, zu einem ausdrucksstarken Symbol zu werden für den allgemeinen Zerfall von Sicherheit. Als *Krise* war die sog. 'Grundlagenkrise' auf die frühen 20er Jahre beschränkt, und sie war eine Krise, die in einem engen Zusammenhang stand zur sozialen Krise dieser Zeit. Zeitlich parallel zur politischen und sozialen Stabilisierung gewannen auch die Mathematiker das Vertrauen in ihre Disziplin zurück. Die Debatte wurde beigelegt, ohne daß sie zu Ende geführt worden wäre. Die Grundlagenkrise ist damit ein klassisches Beispiel für das, was Hansjörg Siegenthaler als 'Orientierungskrise' bezeichnet (Siegenthaler 1993). Diesem Zusammenhang gehe ich in Kapitel 5 nach.

Zunächst aber soll erörtert werden, was eine wissenssoziologische Perspektive auf die Mathematik bedeutet und was sie impliziert (Kap. 3). Dazu werde ich einen kurzen Überblick geben über die wechselvolle Beziehungsgeschichte von Wissenssoziologie und Wissenschaftssoziologie (3.1.), um in Anschluß daran zu prüfen, inwieweit sich auch die Mathematik einer wissenssoziologischen Betrachtung erschließt (3.2.).

# Kapitel 3
# Wissenssoziologie und Mathematik

> Die Natur mag uns ein lautes Nein entgegenschleudern, aber die menschliche Erfindungskraft ist immer imstande, ein noch lauteres Geschrei zu erheben.
>
> *Imre Lakatos*[1]

## 1. Naturwissenschaft im Kontext

Der Begründer der klassischen Wissenssoziologie war Karl Mannheim (1883 - 1947). Karl Mannheim, ein Freund von Georg Lukács und ein Schüler von Georg Simmel und Ernst Cassirer, hat der Wissenssoziologie in den 20er Jahren programmatische Form und in seinen dichten materialen Studien empirische Kontur verliehen. Heute gelten die Arbeiten, die er zwischen 1925 und 1933 schrieb, als eigentliche Begründungstexte der Wissenssoziologie.[2] 'Wissenssoziologie' nannte Karl Mannheim jene soziologische Disziplin, die, wie er in seinem Aufsatz für Alfred Vierkandts *Handwörterbuch der Soziologie* programmatisch formulierte, »als Theorie eine Lehre von der sogenannten 'Seinsverbundenheit' des Wissens aufzustellen und auszubauen und als historisch-soziologische Forschung diese 'Seinsverbundenheit' an den verschiedenen Wissensgehalten der Vergangenheit und Gegenwart herauszustellen bestrebt ist.« (Mannheim 1931: 227) Was Mannheim hier als 'Seinsverbundenheit' bezeichnet, meinte zunächst einmal und sehr allgemein die »Seinsrelativität« allen Denkens und etwas konkreter die These, daß die »Blickintention und die Fassungskraft der verschiedenen Sichten bedingt sind durch den Lebensraum, in dem sie entstanden sind und für den sie gelten« (Mannheim

1 Lakatos 1971: 71.

2 Die Arbeiten von Mannheim sind bis heute nur verstreut zugänglich. Eine immer noch wertvolle Textsammlung ist der von Kurt H. Wolff herausgegebene Band mit Arbeiten, die Mannheim bis 1933 geschrieben hat. Als Herausgeber und Interpreten von Mannheims Schriften haben sich vor allem David Kettler, Volker Meja und Nico Stehr einen Namen gemacht. Sie haben seit den 80er Jahren viele, auch bislang unpublizierte Arbeiten von Mannheim zugänglich gemacht. Zu Mannheims Werk gibt es allmählich eine breite Sekundärliteratur; vgl. u.a. die Aufsatzsammlung von Kettler, Meja und Stehr 1989.

1931: 234; 243). Erkenntnis vollzieht sich, so die Kernaussage der Mannheimschen Wissenssoziologie, »keineswegs nur 'von der Sache her' und von 'rein logischen Möglichkeiten' geleitet«. Vielmehr bestimmen »an ganz entscheidenden Punkten außertheoretische Faktoren ganz verschiedener Art, die man als 'Seinsfaktoren' zu bezeichnen pflegt, das Entstehen und die Gestaltung des jeweiligen Denkens« (Mannheim 1931: 230).

Mannheims Programm hatte (und hat) erhebliche erkenntnistheoretische Konsequenzen, und es waren auch im wesentlichen diese, die im Zentrum des 'Streits um die Wissenssoziologie' in den 20er und frühen 30er Jahren standen.[3] Es sind vor allem zwei Implikationen, die zu heftigen Kontroversen Anlaß gaben und gegen die sich bereits Mannheim zu schützen versuchte, allerdings mit nur beschränktem Erfolg. Seine Haltung gegenüber Mathematik und Naturwissenschaft ist jedenfalls eine direkte (wenn auch nicht unbedingt konsistente) Reaktion auf die Probleme, die er sich mit seinem 'relationistischen' Ansatz eingehandelt hatte.

(1) Wenn jegliches Wissen standortgebunden ist, d.h. nicht einfach den Gegenstand, auf den es sich bezieht, reflektiert, sondern 'gebrochen' ist durch den jeweiligen sozialen Ort der Betrachterin, dann läßt sich kein kontextfreies Wissen mehr denken und es gibt auch keine übergreifenden Evaluationskriterien mehr, um verschiedene konkurrierende Geltungsansprüche zu beurteilen. Die These der 'Seinsgebundenheit' des Denkens impliziert, radikal interpretiert, nicht nur, daß die Richtung, die das Denken nimmt, von sozialen Faktoren mit beeinflußt ist, sondern behauptet zusätzlich eine 'Seinsrelativität' auch für den *context of justification*: Sozial imprägniert sind nicht bloß die Wissensinhalte, sondern auch die Kriterien, nach denen sie beurteilt werden. Das hat Konsequenzen nicht zuletzt auch für den Status der Naturwissenschaft. Denn so gesehen sind unterschiedliche Positionen in naturwissenschaftlichen Debatten geprägt durch den sozialen Standort und die Interessenlagen der Kontrahenten und können nicht mehr ausschließlich unter Bezugnahme auf ein unabhängiges Außenkriterium, die 'objektiven' Daten z.B., entschieden werden. »Eine Naturwissenschaft aber, die sich *soziologisch* erklären läßt (...), verliert ihren absoluten Erkenntnisanspruch, wird zu einer relativen Wahrheit«, so der Hauptvorbehalt gegen eine wissenssoziologische Betrachtung der Naturwissenschaft (Gad Freudenthal 1980: 153).

---

3 Dokumentiert ist diese Debatte in den beiden von Volker Meja und Nico Stehr herausgegebenen Bänden *Der Streit um die Wissenssoziologie* (Meja/Stehr 1982).

Die Gegner einer Wissenssoziologie der Wissenschaft hatten zwei Hauptargumente bereit, um ihre Ablehnung zu begründen: »Social developments do not determine the content of scientific developments, simply because they do not determine natural facts« (Stark 1958: 171), und, als zweiter Einwand, »if they (die theoretischen Konzepte, B.H. ) simply reflected the organisation of a particular society, they would not so well fit the physical world« (Emile Benoit-Smullyan, zit. in Bloor 1982: 292). Der Haupteinwand galt dabei dem epistemischen Relativismus, auf den die Wissenssoziologie in ihren Augen hinauszulaufen schien, während die eigene Haltung auf der nicht weiter reflektierten Annahme beruhte, daß es tatsächlich kontextunabhängige Wahrheitskriterien gibt. Damit aber war eine erkenntnistheoretische Position formuliert, die eine wissenssoziologische Betrachtung von Naturwissenschaft (und Mathematik) lange Zeit verhindert hat.

(2) Die These der 'Seinsgebundenheit' des Denkens hat nicht nur Konsequenzen für den Wahrheitsanspruch der Naturwissenschaften, sondern auch für die Wissenssoziologie selbst. Denn wenn tatsächlich alles Wissen relativ ist zum Standort des Erkennenden, dann muß dies auch für die Wissenssoziologie selbst gelten: »For if all beliefs distort, how can there be true beliefs about the real, and in particular how do we know there is a 'real' to be distinguished from the distortion? This reflexive argument certainly hits Mannheim's own theory, for this is quite clearly a social theory of the same kind as it refers to, and must therefore itself be socially induced according to its own principles.« (Hesse 1980a: 31) Die Wissenssoziologie, und nicht zuletzt ihre zentrale These der 'Seinsrelativität' jeglichen Wissens, ist eine partikulare Perspektive, die ebensowenig absolute Gültigkeit für sich beanspruchen kann wie irgendeine andere Wissensform.[4]

Mannheim selbst hat sich immer wieder energisch gegen den Relativismus-Vorwurf verwahrt. Paul Feyerabends »anything goes« wäre ihm vermutlich ein Greuel gewesen. »Man kann sehr wohl behaupten«, schrieb er bereits 1925 in seinem Aufsatz *Das Problem einer Soziologie des Wissens*, »daß das Denken seinsrelativ, seinsabhängig, nicht autonom, Teil einer über es herausragenden Totalität sei, ohne zugleich einen 'Relativismus' bezüglich des 'Wahrheitswertes' der Erkenntnisse zu verkün-

4 Tom Bottomore hat diesem Reflexivitätsargument die schöne Form einer Paradoxie gegeben: »For if all propositions are existentially determined and no proposition is absolutely true, then this proposition itself, if true, is not absolutely true, but is existentially determined.« (Zit. in: Bloor 1976: 14)

den. Es bleibt hier sozusagen noch offen, ob man mit einer Seinsrelativierung des Denkens zugleich auch einen erkenntnistheoretischen Relativismus verknüpft oder nicht. Für alle Fälle sei es aber bei dieser Gelegenheit ausgesprochen, daß wir jene Angst, die das gegenwärtige Denken dem Relativismus gegenüber bekundet, nicht teilen können.« (Mannheim 1925: 311) Um dem Relativismus-Verdacht erfolgreich begegnen zu können, hatte er folglich zu zeigen, daß seine These einer Perspektivität jeglichen Denkens mit einer nicht-relativistischen Position vereinbar war.

Es waren vor allem zwei Argumentationsstrategien, mit denen Mannheim den Relativismus-Vorwurf zu entkräften suchte, ohne daß ihm dies allerdings ganz gelungen wäre. Die eine Strategie bestand darin, daß er den beiden gesellschaftlich anerkanntesten (und sakrosanktesten) Wissensformen – der Naturwissenschaft und der Mathematik – einen epistemologischen Sonderstatus zuwies und sie aus seinem wissenssoziologischen Programm ausschloß. Aufgrund der unterschiedlichen Konstituiertheit ihres Gegenstandsbereiches betrachtete er Naturwissenschaft (und Mathematik) auf der einen, Sozial- und Geisteswissenschaften auf der anderen Seite als zwei grundlegend verschiedene Wissensformen. Im einen Fall ist der Gegenstandsbereich invariant und bewußtseinsunabhängig gegeben, im anderen Fall variabel und sinnkonstituiert. Im Falle der Naturwissenschaften war es seiner Meinung nach »in der Tat möglich (...), von dem geschichtlichen Hintergrund des erkennenden Subjekts unabhängig die Erkenntnisse zu sammeln, Wahrheiten zu finden« (Mannheim 1922: 110). Und die Mathematik – der »Wissenstypus nach dem Paradigma '2 x 2 = 4'« – galt ihm sogar als Modellfall einer Wissensform, bei der die »Genesis unter allen Umständen geltungsirrelevant« ist (Mannheim 1931: 251). Dies im Gegensatz zum sozialen und historischen Wissen, das »in seiner Struktur so eng mit dem geistigen Standort, von wo aus es gemacht wird, verbunden (ist), daß der Gang und die Struktur der Entwicklung bei allen diesen Wissenschaften ein ganz anderer ist« (Mannheim 1922: 111).

Entscheidender noch als diese Strategie der Selbstbeschränkung war allerdings Mannheims Bemühen, ein Konzept von Objektivität zu entwickeln, das mit seiner These der Seinsgebundenheit des Denkens vereinbar war. Wie lassen sich, um Mannheims Begriff zu benützen, »Perspektivität« und Objektivität verbinden? Wie lassen sich trotz der Relativität der Perspektiven Wissensansprüche beurteilen und rangieren? Wie läßt sich, anders formuliert, der Geltungsanspruch der Wissenssoziologie rechtfertigen? Es gehe nicht darum, führt Mannheim aus, die »Perspektivität zu vertuschen und zu entschuldigen«, sondern um die Frage, »wie *im* Elemente dieser Perspektivität Erkenntnis und Objektivität möglich ist« (Mannheim 1931: 255). Relationismus bedeute nicht Relativismus. Die These einer Standortgebundenheit des Wissens impliziere nicht Beliebigkeit, sondern beschränke sich auf die Behauptung, daß »jede Aussage wesensmäßig nur relational formulierbar« ist. Ähnlich, und das führt hin zu seinem neuen Konzept von Objektivität, wie ja auch der »Raumgegenstand wesensmäßig nur perspektivisch gegeben sein kann«. Auch beim Sehen gehe es nicht darum, »wie man ein unperspektivisches Bild zustande bringen könnte, sondern wie man vielmehr durch das Gegeneinanderhalten der verschiedenen Sichten das Perspektivische als solches zu sehen bekommt und damit eine neuartige Objektivität erreichen kann« (Mannheim 1931: 258; 255).

Ohne es im Detail auszuführen, entwickelte Mannheim – in Analogie zur Konsensbildung im visuellen Bereich – ein Konzept von Objektivität, das der Idee einer 'kommunikativen Rationalität' (wie man heute sagen würde) erstaunlich nahe kommt. Objektivität heißt bei Mannheim kommunikativ erzielte Intersubjektivität. Objektivität sei im Falle des »seinsverbundenen Denkens« nur auf Umwegen herstellbar, indem man nämlich »das in beiden Aspektstrukturen richtig, aber verschieden Gesehene aus der Strukturdifferenz der beiden Sichtmodi zu verstehen bestrebt ist und sich um eine Formel der Umrechenbarkeit und Übersetzbarkeit dieser verschiedenen perspektivistischen Sichten ineinander bemüht (...) Genau so wie der Streit bei dem visuellen Gegenstande (...) nicht dadurch geschlichtet wird, daß man eine unperspektivische Sicht konstruiert (was nicht möglich ist), sondern so, daß man aus dem einen standortgebundenen Bilde heraus versteht, warum sich dem anderen dort von jenem Standorte die Sache so und nicht anders gibt, so werden wir auch hier durch das Übersetzen und Umrechnen die Objektivität herstellen.« (Mannheim 1931: 258) Die These der Standortgebundenheit des Denkens muß also, das versucht Mannheim plausibel zu machen, nicht unweigerlich in erkenntnistheoretische Beliebigkeit münden. Objektivität erfordert nicht, daß die dem Denken inhärente Perspektivität aufgehoben wird, sondern wird dadurch erzielt, daß man gegenseitig zu verstehen sucht, weshalb sich den einen ein Gegenstand so darstellt und den anderen anders. Genau darin besteht in Mannheims Sicht auch die Aufgabe der Wissenssoziologie.

Wie die heutige Wissenssoziologie der Wissenschaft argumentativ wie empirisch vorführt, hätte sich dieses neue Objektivitätskonzept auch auf die Naturwissenschaften übertragen lassen. Mannheim (und seine Nachfolger mit ihm) haben diese Konsequenz jedoch nicht gezogen – und haben damit den Grundstein gelegt für die jahrzehntelange Trennung von Wissenssoziologie und Wissenschaftssoziologie. Diese untersuchte ganz im Sinne des Mannheimschen Programms die soziale Gebundenheit des Wissens, reduziert allerdings auf dessen 'weiche' Formen, auf politische und soziale Theorien, auf Kunst und alltagstheoretische Deutungsmuster, jene beschränkte sich auf die Analyse der institutionellen Rahmenbedingungen und der sozialen Organisation der (Natur-)Wissenschaft und klammerte dafür die Inhalte aus. »Sociology could say nothing about the form or content of scientific knowledge itself, because the conclusions of science were thought to be determined by the physical and not the social world.« (Mulkay 1979a: 60) Wissenschaftliches Wissen galt als epistemologischer 'Spezialfall' – als universell und als vom sozialen Kontext unabhängig.

Es sind vor allem zwei Gründe, weshalb Mannheim und seine Nachfolger die These eines epistemologischen Sonderstatus von Naturwissenschaft und Mathematik aufrechterhalten haben. Der erste Grund war der allezeit drohende Relativismus-Vorwurf. Mannheim ist es nicht gelungen, ihn konsistent zu widerlegen, und die Wissenssoziologie nach ihm hat darauf mit einer Strategie der Selbstbescheidung reagiert.[5] Anstatt alle Wissenstypen und Wissensformen in ihren Erklärungsanspruch einzubeziehen, hat sich die Wissenssoziologie lange Zeit auf *soziales* Wissen beschränkt und zudem die brisante Frage der Geltung von Ideen fallengelassen zugunsten der sehr viel weniger kontroversen ihrer *Entstehung*. Oder wie es Werner Stark in den 50er Jahren programmatisch formulierte: »The sociology of knowledge is concerned in the first place with the origin of ideas, and not with their validity. It tries to understand why people have thought as they have, not to test whether what they have thought was the truth.« (Stark 1958: 152) Wenn naturwissenschaftliches Wissen überhaupt untersucht wurde, dann erschien es erklärungsbedürftig nur dann, wenn es sich als 'falsch' erwiesen hatte. Karin Knorr-Cetina bezeichnet dieses Wissenschaftsbild treffend als 'Kontaminationsmodell': »Bei Ergebnissen, die als 'falsch' diskreditiert wurden, wird nach sozialen Ursprüngen gesucht, während Inhalte, solange sie als wahr gelten, durch kognitive (wissenschaftliche, rationale) Faktoren erklärt werden. Diese Vorgangsweise entspricht einem Modell der 'Kontamination' des

5 Vgl. dazu ausführlicher Stehr/Meja 1982: 904ff.

Wissenschaftlichen durch das Soziale: Es wird unterstellt, daß soziale Einflüsse wissenschaftliche Verfahren derart 'kontaminieren', daß sie zu inkorrekten Ergebnissen führen.« (Knorr-Cetina 1988: 85)

Der zweite Grund, weshalb Naturwissenschaft und Mathematik aus dem Hoheitsgebiet der Wissenssoziologie ausgeschlossen wurden, ist wesentlicher und hat zu tun mit dem (naiven) erkenntnistheoretischen Realismus, der bis in die 60er Jahre das wissenschaftssoziologische Denken prägte. Im Kern läßt sich die realistische Position auf drei Annahmen reduzieren:

»R 1: Es gibt eine Wirklichkeit, die der Existenz nach von uns und unserem Bewußtsein unabhängig ist.

R 2: Die Wirklichkeit weist Beschaffenheiten und Strukturen auf, die von unserem Bewußtsein unabhängig sind.

R 3: Nennenswerte Teile der Wirklichkeitsstrukturen sind unserem Erkennen zugänglich und werden in unserem Wissen erfaßt.« (Franzen 1992: 23)

Es ist vor allem die 3. (erkenntnistheoretische) Regel, die Realisten von Skeptikern und Konstruktivsten trennt. R1 und R2 sind dagegen kaum umstritten. Während erkenntnistheoretische Realisten im allgemeinen an einer Korrespondenztheorie der Wahrheit festhalten, neigen Anti-Realisten eher zu einer Konsenstheorie der Wahrheit: Wahrheit läßt sich nicht grundsätzlich abtrennen von unserem Fürwahrhalten. Es ist diese letzte – erkenntnistheoretische – Annahme (und nicht die beiden ontologischen Thesen 1 und 2), die sich, vor allem in ihrer naiven Variante, nur schlecht vereinbaren läßt mit einer wissenssoziologischen Betrachtung der Wissenschaft.[6] Denn aus (naiv)realistischer Sicht verfügt die Wissenschaft über eine sichere und theorieneutrale empirische Basis. Über die Wahrheit von Theorien entscheidet die Beobachtung (bzw. deren sprach-

6 Der naive Realismus, so wie ich ihn im folgenden kurz beschreibe, gibt die philosophische Diskussion natürlich nur vergröbert wieder. Dennoch war es diese naive Position – und nicht die differenzierte der Spezialisten der Wissenschaftsphilosophie –, die die Haltung der Wissenschaftssoziologie lange Zeit bestimmte. Auf das Für und Wider der realistischen bzw. anti-realistischen Position möchte ich hier nicht im einzelnen eingehen; vgl. dazu den informativen Sammelband, der vom *Forum für Philosophie Bad Homburg* 1992 herausgegeben wurde. Die Wissenssoziologie der Wissenschaft, um die es mir hier geht, vertritt – hinsichtlich der 3. Annahme – eine anti-realistische (und damit auch eine tendenziell relativistische) Position. Interessanter aber als ihr erkenntnistheoretisches 'label' ist ihre Fragestellung: Die neuere Wissenschaftssoziologie versteht sich als *empirische* Epistemologie, d.h. sie konfrontiert das (normative) Wissenschaftsmodell der Wissenschaftstheorie mit der alltäglichen Praxis der Wissenschaft. Ich komme darauf zurück.

liche Protokollierung), und diese ist grundsätzlich unabhängig von den (alltagstheoretischen und wissenschaftlichen) Vorannahmen des erkennenden Subjekts – sofern es sich an die normativen Direktiven des wissenschaftlichen Arbeitens hält.[7]

Wenn aber wissenschaftliches Wissen tatsächlich in der Lage ist, ein Abbild zu liefern der Wirklichkeit, die es beschreibt, dann bleibt kein Raum mehr für den Einfluß *sozialer* Faktoren: »There may be some slight room for cultural variation with respect to theoretical observations, for their content is not wholly determined by observational data. But the greater portion of scientific knowledge, directly rooted as it is in empirical evidence, is necessarily independent of the society (...) The social origin of scientific knowledge is almost completely irrelevant to its content, for the latter is determined by the nature of the physical world itself.« (Mulkay 1979a: 21) Soziale Prozesse spielen eine Rolle nur im Sinne eines Störfaktors. Sie erklären, so die Logik des 'Kontaminationsmodells', weshalb es mitunter zu Irrtum und zu Verzerrungen kommt, sind aber irrelevant, sobald es um 'wahres' Wissen geht. Eine Soziologie wissenschaftlichen Wissens ist aus diesem Grund, so Mary Hesse, notwendig beschränkt »to the pathology of belief: to irrationality, or error, or deviance from rational norms« (Hesse 1980a: 32). Erklärungsbedürftig ist nur das 'falsche' Wissen, nie aber das 'wahre'.

Erst mit der Umorientierung in der Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaftsgeschichte in den 60er Jahren sind die epistemologischen Voraussetzungen für eine *wissenssoziologische* Betrachtung der Naturwissenschaften (und Mathematik) geschaffen worden. Denn solange man an der Annahme festhielt, daß Beobachtung ein voraussetzungsloses Re-

---

7 Husserls 'Generalthesis der natürlichen Einstellung' ist gewissermaßen die alltagsweltliche Variante des philosophischen Realismus, und dies ist auch der Grund dafür, weshalb Winfried Franzen behaupten kann: »Realist wird man nicht (...), sondern ist es immer schon.« (Franzen 1992: 40) Genau daran macht Husserl dann auch seine Wissenschaftskritik fest (vgl. S. 38f.): Der 'Objektivismus' verkenne, so Husserl in seinem *Krisis*-Werk 1936, daß wissenschaftliche Beobachtung sich auf eine bereits sinnhaft vorkonstituierte Welt bezieht. Es sei diese Tendenz zur Reifikation, die die (positivistische) Wissenschaft mit der 'natürlichen Einstellung' teile. Husserls Kritik am objektivistischen Wissenschaftsverständnis seiner Zeit ist allerdings auf nur wenig Resonanz gestoßen, und daran hat sich bis heute kaum etwas geändert. Die Umbrüche in der Wissenschaftsphilosophie, auf die ich noch zu sprechen kommen werde, haben sich praktisch ohne Bezug zur (Sozial-)phänomenologie vollzogen, und auch die gegenwärtigen Versuche, eine Wissenssoziologie wissenschaftlichen Wissens zu entwickeln, stehen eher in der Theorietradition des Symbolischen Interaktionismus und der Ethnomethodologie als in jener der Sozialphänomenologie, obschon es von der Sache her viel Überschneidungen gäbe.

gistrieren ist und über die Akzeptanz von Theorien allein die Empirie entscheidet, solange war es aus prinzipiellen Gründen undenkbar, daß nicht bloß die institutionellen Rahmenbedingungen der Wissenschaft, sondern vielleicht auch ihre Inhalte sozial kontingent sind.

Es waren vor allem zwei Entwicklungen, die den Boden bereiteten für eine wissenssoziologische Betrachtung von Naturwissenschaft (und Mathematik) – die These einer empirischen Unterdeterminiertheit von Theorien und die These der Theoriegeladenheit empirischer Beobachtung.[8]

(1) Die *Unterdeterminiertheitsthese* besagt, daß Theorien durch die Beobachtungsdaten nicht eindeutig bestimmt sind. Für jede Menge empirischer Beobachtungen gibt es im Prinzip immer mehrere Theorien, die mit ihnen kompatibel sein können. Es führt, anders formuliert, nicht nur *ein* Weg von den Tatsachen zu den Theorien (und wieder zu ihnen zurück). Vielmehr sind immer mehrere, auch untereinander unverträgliche Theorien denkbar, die mit denselben empirischen Beobachtungen im Einklang stehen können. Die These der empirischen Unterdeterminiertheit von Theorien richtet sich nicht so sehr gegen die Annahme, daß allgemeine Aussagen induktiv aus empirischen Beobachtungen gewonnen werden können, sondern zielt vielmehr auf den 'context of *justification*': Theorien sind aufgrund empirischer Kriterien allein nicht entscheidbar; Daten reichen als Kriterium nicht aus, um zwischen konkurrierenden Theorien zu entscheiden. Gegen die Annahme, daß Theorien empirisch verifizierbar seien, hatte zwar schon Karl Popper in den 30er Jahren mit Erfolg argumentiert. Dem Induktionsmodell des logischen Positivismus hielt er bekanntlich plausibel entgegen, daß man höchstens wissen kann, ob eine Theorie falsch ist, nie aber ob sie auch wahr ist. W.V.O. Quine geht aber in seiner Formulierung der Unterdeterminiertheitsthese über Popper hinaus, indem er zeigt, daß Theorien empirisch auch dann nicht entscheidbar sind, wenn man alle möglichen (und nicht nur alle faktischen) Beobachtungen (bzw. wahren Beobachtungssätze) berücksichtigen würde.

---

8 Zu erwähnen wären hier vor allem die Arbeiten von Paul Feyerabend, Norwood R. Hanson, Thomas S. Kuhn, Imre Lakatos, W.V.O. Quine und Stephen Toulmin, wobei die einzelnen Autoren sich in ihren Ansichten teilweise beträchtlich unterscheiden. Quine z.B. hat sich immer vehement gegen relativistische Positionen gewandt, und ähnlich hat auch Imre Lakatos mit seiner 'Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme' die Vorstellung eines rationalen Ganges der Wissenschaft gegen relativistische Tendenzen zu verteidigen versucht. Für eine Darstellung der 'antipositivistischen Wende' in der Wissenschaftsphilosophie und -geschichte vgl. u.a. Andersson 1988; Bayertz 1980; Hoyningen-Huene 1989; Mulkay 1979a; Stegmüller 1987, insb. Kap. 3.

In eine ähnliche Richtung weist auch der epistemische Holismus, so wie er von W.V.O. Quine (unter Bezugnahme auf Pierre Duhem) formuliert und von Imre Lakatos später weitergeführt worden ist (deshalb auch die Bezeichnung 'Duhem-Quine-These'). Die *Duhem-Quine-These* richtet sich gegen den 'Isolationismus', der dem logischen Positivismus und dem Falsifikationismus Popperscher Prägung gleichermaßen eigen ist, d.h. gegen die Vorstellung, daß man Hypothesen je einzeln zum Gegenstand empirischer Überprüfung machen kann. Theoretische Annahmen lassen sich jedoch, das ist die Quintessenz der Duhem-Quine-These, niemals isoliert voneinander überprüfen. Vielmehr ist es immer das theoretische System als Ganzes, das zur Disposition gestellt wird.[9]

Dies aber hat Folgen für den Status der Empirie. Im Falle einer widersprüchlichen Beobachtung – das zeigen die Beispiele aus der Wissenschaftsgeschichte, die Kuhn, Feyerabend und Lakatos zusammengetragen haben – wird selten das theoretische System als Ganzes infrage gestellt. Statt dessen werden oft Anpassungen vorgenommen, solange bis die 'Anomalie' verschwunden ist. »The dogma of reductionism survives in the supposition that each statement, taken in isolation from its fellows, can admit of confirmation or infirmation at all. My countersuggestion (...) is that our statements about the external physical world face the tribunal of sense experience not individually but only as a corporate body (...) If this view is right, it is misleading to speak of the empirical content of an individual statement (...) Furthermore it becomes folly to seek a boundary between synthetic statements, which hold contingently on experience, and analytic statements, which hold come what may. Any statement can be held true come what may, if we make drastic enough adjustments elsewhere in the system.« (Quine 1953: 41; 43)

Was Quine in seinem berühmten Aufsatz *Two Dogmas of Empiricism* mit theoretischen Argumenten begründet, hat Thomas Kuhn einige Jahre später mit wissenschaftshistorischen Beispielen belegt: Die Praxis der Wissenschaft folgt nicht den normativen Vorgaben von Poppers Falsifi-

9 Zur Duhem-Quine-These vgl. auch Stegmüller 1987: 265ff. sowie kritisch Krips 1982. Pierre Duhem hat dieses pragmatische Prinzip folgendermaßen formuliert: »When certain consequences of a theory are struck by experimental contradiction (...) we are not told by the experiment what must be changed. No absolute principles direct this inquiry, which different physicists may conduct in very different ways (...) For instance one may be obliged to safeguard certain fundamental assumptions (...) by complicating the schematism (...) The next physicist, disdainful of these complicated artificial procedures, may decide to change one of the essential assumptions.« (Zit. in Krips 1982: 251)

kationsmodell. Theorien werden in der Regel beibehalten, auch wenn Beobachtungen ihnen widersprechen. Eine 'Anomalie' ist kein ausreichender Grund, um eine Theorie aufzugeben (Kuhn 1962). Zu einem ähnlichen Schluß gelangte auch Imre Lakatos, allerdings mit der Absicht Poppers rationalistisches Wissenschaftsmodell gegen Kuhns Relativismus zu verteidigen (Lakatos 1970). Lakatos' *Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme* ist ein (letztlich jedoch gescheiterter) Versuch, Holismus und Rationalismus miteinander zu versöhnen.

Im Gegensatz zu Kuhn und Feyerabend hält Lakatos an der Vorstellung fest, daß die Entwicklung der Wissenschaft ein rationaler Prozeß ist. Es sind in seinen Augen objektive Faktoren – und nicht soziale oder psychologische, wie Kuhn behauptet –, die erklären, weshalb Theorien zu einem bestimmten Zeitpunkt durch andere ersetzt werden. Gegen Popper wendet er jedoch ein, daß Falsifikationen für den Gang der Wissenschaft eine nur unbedeutende Rolle spielen. Die Wissenschaftsgeschichte zeichne sich durch Kontinuität aus, und nicht durch permanenten Wandel, wie es das Falsifikationsmodell an sich nahelegt. Eine Theorie wird, so Lakatos in seinem grundlegenden Aufsatz zur Falsifikationsproblematik, frühestens dann verworfen, wenn eine bessere Alternative zur Verfügung steht. Im Innern eines jeden theoretischen Systems gibt es einen 'harten Kern', der gewöhnlich vor Falsifikationen geschützt wird. Um ihn herum ist ein 'Schutzgürtel' von Hilfshypothesen gelagert, und es sind diese, die beim Auftreten von widersprüchlichen Beobachtungen modifiziert werden. Anstatt angesichts von 'Anomalien' die theoretischen Grundannahmen klaglos fallenzulassen, werden wir, wie Lakatos schreibt, »use our ingenuity to articulate or even invent 'auxiliary hypotheses', which form a *protective belt* around this core« (Lakatos 1970: 48). Erst wenn sich ein neues Forschungsprogramm als ganzes als überlegen erweist, wird das alte fallengelassen.

Die Unterdeterminiertheitsthese impliziert Kontingenz – oder läßt sie zumindest zu.[10] Theorien sind nicht durch ihren empirischen Gegenstand determiniert; mit denselben Beobachtungen können verschiedene Theorien kompatibel sein. Und umgekehrt sind widersprüchliche Beobachtungen offenbar kein ausreichender Grund dafür, um eine Theorie aufzugeben (Duhem-Quine-These). Die Praxis der Wissenschaft folgt, so das

10 Da beide Thesen, die These der empirischen Unterdeterminiertheit von Theorien und die Duhem-Quine-(Lakatos)-These sehr oft in einer zusammengefaßt werden, werde ich folgenden ebenfalls nicht zwischen ihnen unterscheiden. Wenn ich von der einen spreche, ist die andere immer mitgemeint.

Fazit der wissenschaftshistorischen Untersuchungen von Kuhn, Feyerabend und Lakatos, nicht dem Ideal des Popperschen Falsifikationsmodells. Wenn aber empirische Gründe allein nicht ausreichen, um zwischen verschiedenen Theorien zu entscheiden, dann stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien dann die Theoriewahl erfolgt – und genau hier setzt die neuere Wissenssoziologie wissenschaftlichen Wissens an: »Where logic and observation are insufficient to determine scientific conclusions, there historians may look to *social* explanations to fill the gaps.« (Hesse 1980a: 36)

Wie die Kritiker einer Wissenssoziologie der Wissenschaft an sich zu Recht einwenden, folgt aus der Unterdeterminiertheitsthese nicht notwendig, daß der durch sie freigegebene Raum auch tatsächlich durch soziale Faktoren besetzt ist. Es könnten auch andere, 'rationale' Gründe sein, die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen dazu bewegen, einer Theorie den Vorrang über eine andere zu geben, z.B. deren Einfachheit, Genauigkeit oder deren 'heuristisches Potential', wie Lakatos meint. Aber auch wenn aus der Unterdeterminiertheitsthese eine wissenssoziologische Perspektive nicht zwangsläufig folgt, so ist sie zumindest mit ihr kompatibel. Mit der These, daß sich weder die Entwicklung noch die Rechtfertigung von Theorien ausschließlich unter Bezugnahme auf die 'Natur' erklären läßt, wurde ein wesentliches epistemologisches Hindernis für eine wissenssoziologische Betrachtung wissenschaftlichen Wissens aus dem Weg geräumt.

(2) Die These der empirischen Unterdeterminiertheit von Theorien ist an sich nicht unvereinbar mit der konventionellen Separierung von Theorie und Beobachtung. Diese Grenzziehung – und damit die Annahme, daß die Wissenschaft über eine sichere und invariante empirische Basis verfügt – wird erst durch die *These der Theoriegeladenheit der Beobachtung* explizit infrage gestellt.[11] Auf einen einfachen Nenner gebracht besagt diese These, daß es keine voraussetzungslose Beobachtung gibt. Jede Feststellung findet statt im Rahmen von theoretischen (und kulturellen) Vorannahmen und mit Hilfe von Meßmethoden und Meßinstrumenten, die ihrerseits wieder theorieinduziert sind. Beobachtung ist stets »Beobachtung im Lichte von Theorien«, wie Karl Popper schon sehr früh gegen den logischen Positivismus seiner Zeit einwandte (Popper 1935: 31). Entsprechend galten ihm die Tatsachenbehauptungen der Wissenschaft nicht

11 Vgl. zur These der Theorieabhängigkeit der Beobachtung ausführlicher Andersson 1988; Bayertz 1980, insb. Kap. VI; Elkana 1986, insb. S. 77 ff.; Hesse 1980b; Mulkay 1979a, insb. Kap. 2.

als theorieunabhängig und invariant. Die empirische Basis der Wissenschaft sei »nichts Absolutes«, schrieb er 1935 in seiner *Logik der Forschung* und fährt in einer schönen Formulierung fort: »Die Wissenschaft baut nicht auf Felsengrund. Es ist eher ein Sumpfland, über dem sich die kühne Konstruktion ihrer Theorien erhebt; sie ist ein Pfeilerbau, dessen Pfeiler sich von oben her in den Sumpf senken – aber nicht bis zu einem natürlichen, 'gegebenen' Grund. Denn nicht deshalb hört man auf, die Pfeiler tiefer hineinzutreiben, weil man auf eine feste Schicht gestoßen ist: wenn man hofft, daß sie das Gebäude tragen werden, beschließt man, sich vorläufig mit der Festigkeit der Pfeiler zu begnügen.« (Popper 1935: 75f.)[12] Wenn aber Beobachtung (bzw. deren sprachliche Protokollierung) tatsächlich theorieabhängig ist, wenn sich, salopp formuliert, die Wirklichkeit tatsächlich anders präsentiert, je nachdem an welcher Theorie man sich orientiert, dann gibt es kein unabhängiges Außenkriterium mehr für die Bewertung von wissenschaftlichen Aussagen: »Scientists do not have access to independent findings against which to check theoretical alternatives. They can never step entirely outside their own analytical scheme, for to do so would deprive their concepts and their propositions of meaning.« (Mulkay 1979a: 34)

Die These, daß Beobachtung keineswegs ein voraussetzungsfreier Prozeß ist, ist allerdings nicht so neu, wie sie sich damals in den 60er Jahren – und nicht zuletzt durch die Arbeiten von Thomas Kuhn – präsentierte. Genau diese Vorkonstituiertheit wissenschaftlicher Beobachtung hatte Ludwik Fleck (1896 – 1961) dreißig Jahre zuvor zum Leitthema seiner Monographie *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache* gemacht – im selben Jahr, nota bene, in dem auch Poppers *Logik der Forschung* erschien und Husserl in verschiedenen Vorträgen seine Gedanken zur *Krisis der europäischen Wissenschaften* formulierte.[13] Eine

12 Trotz seiner Kritik am positivistischen Empirieverständnis hat Popper jedoch weiterhin an der Vorstellung festgehalten, daß Theorien, wenn man sie schon nicht verifizieren kann, sich doch zumindest falsifizieren lassen. Damit hat er sich allerdings ein Problem eingehandelt, nämlich zu begründen, inwieweit die Empirie trotz der von ihm konstatierten Theorieabhängigkeit der Basissätze immer noch eine unabhängige Falsifikationsinstanz sein kann. Es ist vor allem dieses Problem, das ihm später, wie ich weiter oben bereits kurz ausgeführt habe, erhebliche Kritik eingetragen hat; vgl. dazu vor allem Andersson 1988.

13 Flecks Arbeiten waren lange Zeit vergessen. Sie wurden erst Ende der 70er Jahre wieder entdeckt und sind seither auf beträchtliche Resonanz gestoßen. Nicht von ungefähr. Denn mit seiner, wie er es selbst nannte, 'Soziologie des Erkennens' hat Fleck ausgeführt, was Mannheim noch nicht gewagt hatte, nämlich eine Wissenssoziologie der Naturwissenschaft zu formulieren. Mit seinen theoretischen Über-

wissenschaftliche Tatsache ist nicht, wie es der logische Positivismus des Wiener Kreises behauptete, gegen dessen Tatsachenbegriff sich Flecks Studie vornehmlich richtete, eine 'Naturtatsache', etwas, was objektiv gegeben ist, sondern ganz im Gegenteil ein höchst kontingentes, höchst voraussetzungsvolles und sehr oft nicht intendiertes Produkt kollektiver wissenschaftlicher Arbeit (Fleck 1935). Erkennen ist, wie Fleck immer wieder betont, »eine soziale Tätigkeit«, und nicht eine individuelle Handlung (Fleck 1960: 176). »Alles Erkennen ist ein Prozeß zwischen dem Individuum, seinem Denkstil, der aus der Zugehörigkeit zu einer sozialen Gruppe folgt, und dem Objekt.« (Fleck 1947: 168) Wissen ist bei Fleck ein genuin soziales Phänomen. Was gedacht wird und was beobachtet wird, ist geprägt durch das »Denkkollektiv«, dem man angehört. Im Rahmen von Kommunikationsprozessen – dem »Denkverkehr«, wie Fleck schreibt –, wird Wissen erzeugt und validiert. Entsprechend ist wissenschaftliche Beobachtung kein passives, voraussetzungsloses Registrieren, sondern ein »gerichtetes Wahrnehmen« - ein, wie Fleck im Sinne der Gestaltpsychologie formuliert, denkstilabhängiges »Gestaltsehen«, das im wissenschaftlichen Sozialisationsprozeß erworben und praktisch eingeübt wird. Beobachtung setzt mit anderen Worten Enkulturation voraus: »Man muß erst lernen, zu schauen.« (Fleck 1935b: 60)

Mit dem Wandel des 'Denkstils' wandeln sich folglich auch die Tatsachen – »schon darum, weil Denkveränderungen in veränderten Tatsachen sich offenbaren und umgekehrt grundsätzlich neue Tatsachen nur durch neues Denken auffindbar sind« (Fleck 1935: 69). Im Prinzip, so die Konsequenz aus Flecks These der grundsätzlichen »Denkstilabhängigkeit« aller Wahrnehmung, sieht sich jedes Denkkollektiv vor eine partiell andere Wirklichkeit gestellt. Die Angehörigen unterschiedlicher Denkkollektive üben, um Kuhns berühmte Formulierung der Inkommensurabilitätsthese zu paraphrasieren, »ihren Beruf in verschiedenen Welten« aus (Kuhn 1962: 198). Was Fleck als 'Denkstil' bezeichnet, erschöpft sich jedoch nicht in den wissenschaftlichen Voranannahmen, die an den Gegenstand herangetragen werden. In ihn gehen auch alltagstheoretische

---

legungen zum wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß, die er am Beispiel der Medizin illustrierte (Fleck war Bakteriologe), hat er vieles von dem vorweggenommen, was heute von der neueren Wissenssoziologie der Wissenschaft programmatisch formuliert wird. Vgl. zum Leben und Werk von Fleck u.a. Baldamus (1977), der neben Kuhn als erster auf Flecks Arbeiten aufmerksam gemacht hat, sowie die instruktive Einführung von Lothar Schäfer und Thomas Schnelle zu Fleck 1935.

Vorstellungen und zeitspezifische Deutungsmuster ein – vorwissenschaftliche »Präideen«, wie Fleck sie nannte. Eine wissenschaftliche Tatsache ist, wie Fleck knapp formuliert, historisches »Entwicklungsergebnis und nicht die logisch einzige Möglichkeit« (Fleck 1935: 32). Was Ludwig Fleck 1935 im Detail beschrieben und am Beispiel der Geschichte des Syphilisbegriffs minutiös nachgewiesen hat, avancierte dreißig Jahre später zu einem zentralen Konzept in der neueren Wissenschaftsphilosophie und bereitete das Terrain vor für eine Zusammenführung von Wissenssoziologie und Wissenschaftssoziologie. Kuhns *Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* liest sich streckenweise wie ein 'Remake' von Flecks *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache*.[14]

Die These der *Theoriegeladenheit* empirischer Beobachtung hat Konsequenzen, die in eine ähnliche Richtung weisen wie jene der *empirischen Unterdeterminiertheit* von Theorien: Wenn Beobachtungen tatsächlich von den theoretischen Annahmen geprägt sind, deren Wahrheitsgehalt sie belegen sollen, dann kann die Empirie nicht mehr als unabhängiges Außenkriterium fungieren. Die Wissenschaft verfügt nicht über eine sichere und neutrale Basis, wie die logischen Positivisten noch glaubten. Ihre Tatsachenbehauptungen sind weder unabhängig von den theoretischen Vorannahmen noch über die Zeit hinweg stabil in ihrer Bedeutung. Wir sind, wie Michael Mulkay es formuliert, »never in a position where we can measure an isolated and simple theoretical statement against an unmediated natural world« (Mulkay 1979a: 54). Wenn aber die Empirie keine absolute Instanz mehr ist für die Bewertung von Theorien, dann stellt sich neu die Frage, nach welchen Kriterien dann über den 'Wahrheitsgehalt' von konkurrierenden Theorien entschieden wird. Es ist genau diese Leerstelle, an der die neuere Wissenssoziologie einsetzt: »Wenn die Empirie dem Wissenschaftler bei der Formung seiner Begriffe und bei der Akzeptierung oder Ablehnung von Hypothesen und Theorien einen Spielraum läßt, wenn ihm also stets einige Möglichkeiten offen stehen, zwischen denen eine Wahl zu treffen ist, dann ist a priori die Möglichkeit gegeben, daß diese Wahl von 'externen' und damit soziologisch analysierbaren Faktoren (mit)beeinflußt wird.« (Gad Freudenthal 1980: 155)

---

14 Dem ist in gewissem Sinne tatsächlich so. Wie Kuhn – allerdings nur im Vorwort und sehr knapp – vermerkt, verdankt seine Arbeit Ludwik Fleck einiges. Zu einem Vergleich der Begrifflichkeit von Thomas Kuhn und Ludwik Fleck vgl. Baldamus 1977.

Im Zuge dieser anti-positivistischen Wende in der Wissenschaftsphilosophie haben die Naturwissenschaften ihren epistemologischen Sonderstatus verloren. »Gone is the simple notion that science is built upon a growing corpus of neutral facts. Gone also is the idea that well-established facts are unrevisable and that, consequently, scientific knowledge accumulates in a relatively straightforward fashion.« (Mulkay 1979a: 41) Die Verabschiedung der Idee, daß die 'Natur' die einzige Richtschnur ist für die Entwicklung und Rechtfertigung von Theorien, bedeutet jedoch nicht, daß man damit auch jegliche wissenschaftliche Rationalität ad acta legt.[15] Feyerabends 'anything goes' markiert (vor allem in ihrer popularisierten Fassung) nur eine – und bekanntlich sehr umstrittene – Variante der Reaktionen auf den Perspektivenwechsel in der Wissenschaftsphilosophie. Doch die Umorientierung in der Wissenschaftsphilosophie und -geschichte hat Raum geschaffen für die Idee, daß soziale Prozesse eine nicht nur periphere Rolle spielen bei der Erzeugung und Rechtfertigung von naturwissenschaftlichem (und mathematischem) Wissen. Dieser 'andere' Blick auf die Wissenschaft, der in Mannheims Überlegungen an sich bereits angelegt war, aber von ihm dann doch nicht gewagt wurde, ist seit den 60er Jahren zu einer legitimen Forschungsperspektive geworden.

David Bloor war einer der ersten, der programmatisch formuliert hat, wie eine Wissenssoziologie der Wissenschaft aussehen müßte. Bloor bezieht sich dabei zwar auf Mannheim, wendet jedoch die Mannheimsche Wissenssoziologie konsequent auf die Naturwissenschaften an. In seinem, wie er es nennt, 'starken Programm' der Wissenssoziologie, zählt er vier Bedingungen auf, denen eine Wissenssoziologie der (Natur-)Wissenschaften zu genügen hätte:

»(1) It would be *causal*, that is, concerned with the conditions which bring about belief or states of knowledge. Naturally there will be other types of causes apart from social ones which will cooperate in bringing about belief.

---

15 Obschon das manche Wissenschaftsphilosophen befürchteten. Das Unbehagen, das einige von ihnen angesichts der Kuhnschen Thesen befallen haben mochte, hat Imre Lakatos in folgende Worte gefaßt: »What, then, is the hallmark of science? Do we have to capitulate and agree that a scientific revolution is just an irrational change in commitment, that it is a religious conversion? Tom Kuhn, a distinguished American philosopher of science, arrived at this conclusion after discovering the naivety of Popper's falsificationism. But if Kuhn is right, then there is no explicit demarcation between science and pseudoscience, no distinction between scientific progress and intellectual decay, there is no objective standard of honesty. But what criteria can he then offer to demarcate scientific progress from intellectual degeneration?« (Lakatos 1974: 4)

(2) It would be *impartial* with respect to truth and falsity, rationality or irrationality, success or failure. Both sides of these dichotomies will require explanation.
(3) It would be *symmetrical* in its style of explanation. The same types of cause would explain, say, true and false beliefs.
(4) It would be *reflexive*. In principle its patterns of explanation would have to be applicable to sociology itself. Like the requirement of symmetry this is a response to the need to seek for general explanations. It is an obvious requirement of principle because otherwise sociology would be a standing refutation of its own theories.

This four tenets, of causality, impartiality, symmetry and reflexivity define what will be called the *strong programme* in the sociology of knowledge.« (Bloor 1976: 4f.)

Mit seinem 'starken Programm' der Wissenssoziologie hat Bloor eine radikalisierte Version dessen formuliert, was in Mannheims Wissenssoziologie in Grundzügen zwar bereits angelegt war, aber von ihm dann doch nicht ausgeführt worden ist. Umstritten ist vor allem die dritte These, mit der Bloor behauptet, daß wahre und falsche, rationale und irrationale, erfolgreiche und nicht-erfolgreiche Theorien auf *dieselben* Typen von Ursachen zurückzuführen sind. Diese dritte Bedingung richtet sich gegen das 'Kontaminationsmodell' des Sozialen: Eine Wissenssoziologie naturwissenschaftlichen Wissens hat die Mannheimsche Frage nach der 'Seinsrelativität' des Wissens auch an jenes Wissen zu richten, das für wahr gehalten wird. Der epistemische Status einer Aussage ist für ihre Erklärung nicht von Bedeutung: »All beliefs are to be explained in the same way regardless of how they are evaluated.« (Bloor 1976: 142)

Für Larry Laudan – »the reigning prince of the Popper-dynasty« (Gregersen/Koppe 1988: 448) – ist es diese Symmetriethese, die das Kernstück der Bloorschen Formulierung der Wissenssoziologie bildet und sie tatsächlich zu einem 'starken' Programm macht – einem Programm allerdings, und das ist Laudans Hauptkritik, das letztlich auf einen radikalen Relativismus hinausläuft (Laudan 1981).[16] Was Mannheim und seine

16 Larry Laudan ist nicht der einzige, dem die relativistischen Implikationen der neueren Wissenschaftssoziologie ein Dorn im Auge sind. Der bis jetzt heftigste – und in seinem Ton wohl ungehaltendste – Angriff auf die neuere Wissenssoziologie stammt von Peter Slezak (Slezak 1989). Gegen die Annahme der Kontextgebundenheit naturwissenschaftlichen Wissens stellt er KI-Programme, die mit Erfolg wissenschaftliche Entdeckungen simulieren. Wenn es einem Computerprogramm gelingt, auf der Basis von Beobachtungsdaten und einiger weniger formaler Regeln z.B. das Ohmsche Gesetz zu entwickeln, dann muß, so die Argumentation Slezaks, die wissenssoziologische These einer sozialen Kontextabhängigkeit naturwissenschaftlichen Wissens falsch sein: »A decisive and sufficient refutation of the 'strong programme' in the sociology of scientific knowledge would be the demonstration of a case in which scientific discovery is totally isolated from all social and cultural factors whatever (...) Computer re-discoveries of a wide range of scientific laws precisely challenge the claim that the 'link between premise and conclusion is socially constituted' (...)

Nachfolger noch zu vermeiden suchten, mit verschiedenen Argumenten und unterschiedlichen Strategien, das ist heute für viele Wissenschaftssoziologinnen und -soziologen allerdings zu einem durchaus positiven Kennzeichen geworden. H.M. Collins z.B. bezeichnet die Wissenssoziologie der Wissenschaft, wie sie u.a. von Barry Barnes, David Bloor und ihm selbst vertreten wird, explizit als 'empirical programme of relativism' (u.a. Collins 1983).

Was aber 'relativistisch' genau heißen soll und wer welche Version vertritt bzw. bekämpft, ist freilich nicht immer einfach zu eruieren. So unterscheidet z.B. Karin Knorr-Cetina 1982 im Anschluß an Roy Bhaskar zwischen einem 'epistemic' und einem 'judgemental relativism' und argumentiert, daß die beiden Varianten von den Kritikern oft nicht genügend auseinandergehalten würden. Während der epistemische Relativismus nur behaupte, daß bei der Produktion naturwissenschaftlichen Wissens auch soziale Faktoren eine Rolle spielen, vertrete die zweite Variante des Relativismus die sehr viel stärkere Behauptung einer prinzipiellen Unentscheidbarkeit konkurrierender Geltungsansprüche. In den Augen von Karin Knorr-Cetina und Michael Mulkay ist die neuere Wissenssoziologie relativistisch nur im Sinne der ersten Variante: »The belief that scientific knowledge does not merely replicate nature *in no way* commits the epistemic relativist to the view that therefore all forms of knowledge will be equally successful in solving a practical problem, equally adequate in explaining a puzzling phenomenon (...) Nor does it follow that we cannot discriminate between different forms of knowledge with a view to their relevance or adequacy in regard to a specific goal.« (Knorr-Cetina/Mulkay 1983: 6).[17]

Damit ist freilich noch nichts darüber ausgesagt, was denn aus relativistischer (bzw. instrumentalistischer) Sicht die Kriterien sind, anhand derer sich konkurrierende Theorien beurteilen und rangieren lassen, und vor allem: worüber sich diese rechtfertigen. Im Unterschied zur klassischen Wissenssoziologie scheint zwar eine relativistische Position heute kein Tabu mehr zu sein, eher im Gegenteil, aber – das muß den Kritikern

On the contrary, the programs demonstrate that the widely varying social factors attending the original discoveries played no part in determining their specific contents.« (Slezak 1981: 563; 571f.) Zur Abwehr dieses Angriffs hat sich praktisch die gesamte Prominenz der neueren Wissenssoziologie zur Wort gemeldet. Ich möchte auf diese Debatte hier nicht näher eingehen. Sie ist nachzulesen in zwei Heften der *Social Studies of Science*1989, 19 sowie 1991, 21).

17 Diese Einordnung und Einschätzung wird allerdings nicht von allen geteilt; vgl. z.B. Gregersen/Koppe 1988.

konzediert werden – auch die neuere Wissenssoziologie hat noch keine befriedigende (und erst recht keine einhellige) Antwort auf die Fragen gefunden, die eine relativistische Position aufwirft (den Anti-Realisten geht es freilich umgekehrt nicht besser). Dieser Vorwurf zielt allerdings am Selbstverständnis und den Intentionen der neueren Wissenschaftssoziologie vorbei. Denn anstatt, wie es Mannheim noch tat, nach einer prinzipiellen Lösung des Relativismus-Problems zu suchen, macht die heutige Wissenschaftssoziologie daraus eine *empirische* Frage: »It is precisely the project of the sociology of scientific knowledge to work out in what sense and to what degree we can speak coherently of knowledge as being rooted in social life«, so etwa die Antwort von Karin Knorr-Cetina und Michael Mulkay auf den Vorwurf relativistischer Beliebigkeit (Knorr-Cetina/Mulkay 1983: 6), und ganz ähnlich argumentiert auch David Bloor in seiner Replik auf Larry Laudan: »The question of the kind or scope of the social factors at work in a system of knowledge is entirely contingent and can only be established by empirical study.« (Bloor 1981: 203)

David Bloors 'strong programme' ist zunächst einmal nur ein Programm und keine ausgereifte empirische Theorie – »a meta-sociological manifesto«, wie Larry Laudan unfreundlich vermerkt (Laudan 1981: 174). Es stellt die Forderung auf, eine 'empirische' Epistemologie zu entwickeln, und formuliert die Bedingungen, denen diese zu genügen hätte, ohne jedoch konkrete Aussagen darüber zu machen, wie man sich die Interferenz von sozialen und kognitiven Faktoren bei der Erzeugung und Rechtfertigung wissenschaftlichen Wissens im einzelnen vorzustellen hat. Offen ist insbesondere die Frage, was denn genau *sozial* ist am Wissenschaftlichen. Auf diese Frage wurden drei Antworten formuliert, und diese drei Antworten stehen für drei verschiedene Ansätze in der neueren Wissenschaftssoziologie.[18] Gemeinsam ist ihnen jedoch die Fragestellung: Es geht nicht mehr um die 'Logik der Forschung', sondern um deren *Praxis*. In der neueren Wissenschaftssoziologie wird untersucht, was Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in ihrem Forschungsalltag tatsächlich tun: wie sie in ihrer praktischen Arbeit Unsicherheit beseitigen und Konsens herstellen, wie sie argumentieren und ihre Entscheidungen begründen, wie sie zu Hypothesen gelangen und

18 Die verschiedenen Ansätze der neueren Wissenssoziologie der Wissenschaft lassen sich selbstverständlich auch nach anderen Kriterien klassifizieren. Vgl. zu einer etwas anderen Einteilung u.a. Collins 1985c sowie Knorr-Cetina 1983.

Vertrauen in sie gewinnen – wie, anders formuliert, im Alltag der Forschung eine 'wissenschaftliche Tatsache' konkret entsteht.

(1) Einige Wissenschaftssoziologen – dazu gehören u.a. David Bloor selbst, Barry Barnes, Donald MacKenzie und Steven Shapin – setzen das 'Soziale' mit wissenschaftsexternen Faktoren gleich, konkret: mit sozialen Interessen, von denen angenommen wird, daß sie die Entwicklung wie auch die Durchsetzung von Theorien kausal beeinflussen. Dieser Ansatz, das *Interessenmodell*, kommt der Mannheimschen Wissenssoziologie am nächsten (obschon er in seiner theoretischen und empirischen Argumentation um einiges undifferenzierter ist). Die grundlegende These dabei ist, daß die (wissenschaftsexternen) gesellschaftspolitischen und die (wissenschaftsinternen) professionellen Interessen der Wissenschaftler die Theoriewahl entscheidend beeinflussen. Sozialpsychologische Momente reichen nicht aus, so die Kritik von Barry Barnes und Donald MacKenzie an Thomas Kuhn, um die Entscheidung für ein neues Paradigma zu erklären. Wie Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen konkurrierende Theorien bewerten und welche Haltung sie ihnen gegenüber einnehmen, hat ganz entscheidend mit ihren konkreten Interessen und ihrer sozialen Einbindung zu tun: »What we wish to show is that opposed paradigms and hence opposed evaluations may be sustained, and probably are in general sustained, by divergent sets of instrumental interests usually related in turn to divergent social interests.« (Barnes/McKenzie 1979: 54)

Je nach Zielen und Interessen werden Wissenssysteme bzw. Teile davon geschützt oder abgelehnt. In den Augen von David Bloor erklärt sich z.B. die Entwicklung und Durchsetzung der mechanistischen Philosophie im 17. Jahrhundert relativ handfest über die gesellschaftspolitischen Interessen von Robert Boyle und seinem Kreis. Die Behauptung Boyles, daß die Materie leblos sei, stand in einem engen Zusammenhang zu seinen ordnungspolitischen Vorstellungen und war gegen die Ansprüche der radikalen religiösen Gruppen gerichtet, die ihrerseits eine ihren Zielen entsprechende Naturphilosophie vertraten. »Of course, neither Boyle and Newton, nor their free-thinking opponents, will be found saying that they believe what they do just because of its political implications, though they were deeply concerned with these. Both sides will believe what they do because experience, or reason, or the Bible makes it plain to them. Nevertheless, we know enough of the divergent interests of both sides to explain why all these sources of rational evidence lead to such opposing conclusions. Both groups were arranging the fundamental laws and classifications of their natural knowledge in a way that artfully aligned them with their social goals (...) The effect in each case was to ensure that the classification of things reproduced the classification of men.« (Bloor 1982: 290f.)

Im Anschluß an Mary Hesses Netzwerk-Modell definiert Bloor soziale Interessen als *Kohärenzbedingungen* (Bloor 1982: 282ff.). Dieser Begriff wurde von Mary Hesse eingeführt, um angesichts der empirischen Unentscheidbarkeit von Theorien dennoch begründen zu können, daß die Theoriewahl eine rationale Grundlage hat. Kohärenzbedingungen sind Zusatzbedingungen, die – neben empirischer Adäquatheit – an ein Wissenssystem gestellt werden. Sie sollen auf 'rationale' Weise, d.h. ohne Rekurs auf soziale oder subjektive Faktoren, erklären, weshalb sich ein Wissenssystem gegenüber einem anderen durchsetzt. Während Mary Hesse diese regulativen Prinzipien auf bestimmte gattungsspezifische Randbedingungen sowie auf kognitive Grundkategorien wie Widerspruchsfreiheit, Einfachheit oder Übereinstimmung mit dem jeweiligen Begriff von Zeit, Kausalität, Materie etc. beschränkt, sieht Bloor in den sozialen Interessen, den Klasseninteressen vor allem, einen zentralen Selektionsmechanismus. Kohärenzbedingungen können, so Bloor, »come from nature being put to social use as well as practical use. Certain laws are protected and rendered stable because of their assumed utility for purposes of justification, legitimation and social persuasion. Since these activities are meant to further interests, we can say that interests *are* coherence conditions.« (Bloor 1982: 283)

Das Interessenmodell steht in der Tradition der soziologischen Strukturtheorie. Das 'Soziale' wird an externen Faktoren festgemacht, die gewissermaßen von außen das Denken und Handeln der Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen steuern. »Within this tradition«, so die Kritik von Michael Mulkay, »sociologists have written of ideas (or knowledge-claims, etc.) as being *determined* by social factors in much the same way that the movement of a billiard ball may be seen as determined by the impact of a cue. Given such a causal metaphor, it is particularly difficult to accept that an idea can be socially determined and yet valid; for the nature of the idea appears to depend solely on the character of the cause and to have little or nothing to do with the subject dealt with by the idea. But this kind of causal language need not necessarily play any part in a sociological account of knowledge-production.« (Mulkay 1979b: 66)[19]

19 Zur Kritik am Interessenmodell vgl. auch Yearley 1982; Laudan 1981; Knorr-Cetina 1988: 86. Problematisch ist der Interessenbegriff vor allem dann, wenn er rein objektivistisch gefaßt wird. Ähnlich wie in den empirischen Modellen der Strukturtheo-

(2) Diesem strukturtheoretisch orientierten Modell wissenschaftlichen Wissens stellt das *Diskursmodell*, so wie es u.a. von Michael Mulkay und H.M. Collins vertreten wird, eine Konzeption des 'Sozialen' entgegen, die sich an der Interpretativen Soziologie orientiert. Sozial am Wissenschaftlichen sind die innerwissenschaftlichen Kommunikations- und Konsensbildungsprozesse, in deren Verlauf Deutungen entwickelt, bestritten, verteidigt und stabilisiert werden. »Whether it is the nature of the things one 'sees' in scientific observation, the proper conduct of an experiment, or the adequacy of a theoretical interpretation, scientific agreement appears to be open to contestation and modification, a process often referred to as 'negotiation'. Through contestation and modification, the meaning of scientific observations as well as of theoretical interpretations tends to get selectively constructed and reconstructed in scientific practice.« (Knorr-Cetina/Mulkay 1983: 11) Wissenschaftliche Forschung ist niemals nur, so Michael Mulkay an anderer Stelle, »a matter of registering an objective world. It always involves the attribution of meaning to complex sets of clues generated by scientists' actions on the physical world, and such attribution of meaning is not carried out in a social vacuum maintained by a set of rigid moral prescriptions. Rather the attribution of technical meaning is always inextricably bound up with those processes of social interaction whereby the social attributes of participants and their claims are negotiated.« (Mulkay 1979b: 65) [20]

Untersuchungen, die im Rahmen des Diskursmodells durchgeführt wurden, stellen die positivistische Vorstellung, daß die Empirie eine unzweideutige Richtschnur ist für die Beurteilung von Hypothesen, radikal infrage.[21] Übereinstimmung mit den Daten scheint nur ein Faktor unter vielen zu sein, die die theoretischen Überzeugungen der Wissenschaftler begründen. Dies hat seinen Grund nicht zuletzt darin, daß die Daten keineswegs immer für sich selbst sprechen, sondern in vielen Fällen selbst interpretationsbedürftig sind (vgl. u.a. Collins 1985b). Wie

---

rie bleibt (theoretisch und empirisch) offen, wie man sich die Vermittlung zwischen 'objektiver Lage' und Deutungsmustern vorzustellen hat.

20 Ich beziehe mich hier auf die frühen, konsenstheoretisch orientierten Arbeiten von Michael Mulkay. Er hat seine Position in den letzten Jahren modifiziert und teilweise erheblich radikalisiert; vgl. als Überblick Mulkay 1991.

21 Auf eine direkte Konfrontation von wissenschaftstheoretischer Norm und naturwissenschaftlicher Praxis zielt die hübsche Studie von Michael Mulkay und G. Nigel Gilbert 1981 über die praktische Relevanz von Poppers Falsifikationsmodell für die konkrete wissenschaftliche Arbeit. Das Ergebnis ist nicht weiter überraschend: Zum einen werden Poppers Direktiven unterschiedlich interpretiert, zum anderen entspricht ihnen die wissenschaftliche Praxis nur sehr beschränkt.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zu solchen Interpretationen gelangen - und damit Unsicherheit in Gewißheit transformieren -, ist eine zentrale Fragestellung der neueren Wissenschaftssoziologie (vgl. u.a. Leigh Star 1985).

Jenen, die tagtäglich damit konfrontiert sind, ist freilich sehr wohl bewußt, daß die Beziehung zwischen Theorie und Experiment keineswegs so unproblematisch ist, wie es die positivistische Wissenschaftsnorm unterstellt. In einer von G. Nigel Gilbert und Michael Mulkay durchgeführten Untersuchung begründen Wissenschaftler ihre theoretischen Überzeugungen zum Teil zwar konventionell empiristisch, gleichzeitig weisen sie aber auch darauf hin, daß die Daten sehr oft vieldeutig sind. Es sei meistens »sehr schwer zu sagen, ob eine Beobachtung wirklich das bedeutet, was sie zu bedeuten scheint«, so etwa die Einschätzung eines der Wissenschaftler, die von G. Nigel Gilbert und Michael Mulkay befragt wurden (Gilbert/Mulkay 1985: 217). Wie das Verhältnis von Theorie und Beobachtung dargestellt wird, ob als unproblematisch oder als offen und komplex, ist dabei vorwiegend taktisch begründet. Wenn die eigene Theoriewahl gerechtfertigt werden soll, wird im allgemeinen auf die 'empirische Evidenz' verwiesen. Sobald es aber um entgegengesetzte Überzeugungen geht, wird die Interpretationsbedürftigkeit der Daten in den Vordergrund gerückt.

Solche nachträglichen Begründungen sagen natürlich nur wenig darüber aus, aufgrund welcher Überlegungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sich tatsächlich für die eine oder andere Theorie entscheiden. Wie wird anfängliche Bedeutungsoffenheit in 'Evidenz' transformiert und aufgrund welcher Prozesse werden Meinungsdifferenzen beigelegt? Dazu gibt es eine Reihe von empirischen Studien, die zeigen, daß bei der Produktion von wissenschaftlichen 'Tatsachen' vielfältige soziale Prozesse mit am Werk sind, ganz ähnlich wie es Ludwik Fleck bereits in den 30er Jahren beschrieben hatte. Wissenschaftliche Entscheidungen werden selten isoliert getroffen, sondern sind Gegenstand von Gesprächen und Auseinandersetzungen. Mündliche Interaktionen sind, wie Karin Knorr-Cetina 1988 schreibt, »Werkzeuge im Umgang mit Zeichen« (S. 93). In Gesprächen werden Lösungen aber nicht nur entwickelt, sondern vor allem auch mit Glaubwürdigkeit versehen. Gespräche helfen, individuelle Unsicherheit in geteilte Gewißheit zu transformieren. Deshalb kommen sie vor allem dann zum Einsatz, wenn man sich der eigenen Deutungen unsicher ist (vgl. auch S. 191ff.). Dies gilt für alle Ebenen der wissenschaftlichen Arbeit – für die Interpretation von uneindeutigen Ergebnissen wie für die Beurteilung von konkurrierenden Theorien, für das informelle Gespräch am Arbeitsplatz wie für die reglementiertere Variante des öffentlichen Disputs.

Am Beispiel von öffentlichen wissenschaftlichen Debatten (und ihrer Beilegung) läßt sich besonders gut zeigen, daß solche kommunikativen Prozesse nicht immer dem Ideal rationaler Verständigung entsprechen und der erzielte Konsens in den Daten nur einen unzulänglichen Grund hat (vgl. u.a. Collins 1981; MacKenzie/Barnes; Collins 1981; Wright 1986). In wissenschaftlichen Kontroversen sind im allgemeinen beide Seiten in der Lage, ihre theoretische Argumentation empirisch abzustützen. An guten, auch empirischen Gründen für die jeweilige Position mangelt es meistens nicht. Daß sich dennoch in der Regel nur eine Seite durchsetzt, läßt sich als Hinweis darauf interpretieren, daß wissenschaftlicher Konsens nicht nur rational bzw. technisch begründet ist, sondern auch soziale Dimensionen hat. Das 'gute Argument' allein scheint nicht auszureichen, um eine Kontroverse für sich zu entscheiden. Vielmehr spielen wissenschaftliches Ansehen, Zugang zu Fachzeitschriften und Tagungen, Koalitionsbildungen und nicht zuletzt auch das Geschlecht mit eine Rolle für den Verlauf und für den Ausgang einer Kontroverse.

Bei dem Versuch, ihren Gegenstandsbereich zu deuten und die Geltungsansprüche anderer zu beurteilen, greifen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nicht nur auf diskursives und professionelles Wissen zurück. Zu ihrem Wissensrepertoire gehört auch das implizite, das verinnerlichte Wissen – jenes Wissen, das wir teilweise buchstäblich 'verkörperlicht' haben (vgl. u.a. Collins 1985a; Knorr-Cetina 1991). Das implizite Wissen selbst umfaßt nicht nur professionelle Fertigkeiten, sondern auch alltagsweltliche Kompetenzen und Wissensbestände. Der Gegenstandsbereich, den die Wissenschaftlerin zu deuten versucht, präsentiert sich ihr nicht in 'rohem' Zustand, sondern ist, zumindest aus der Perspektive der Sozialphänomenologie, bereits sinnhaft vorkonstituiert. Wissenschaft ist, wie Husserl schreibt, »Gebilde höherer Stufe«. Ihre Konstruktionen knüpfen an die alltagsweltlichen Vorleistungen an bzw. setzen diese voraus. Oder wie es der Ethnomethodologe Henry C. Elliot formuliert, »commonsense modes of perception and operation are an integral and essential feature of recognized scientific practice« (Elliot 1974: 25).

Gleichzeitig ist das wissenschaftliche Denken und Forschungshandeln aber auch durch epochespezifische Deutungsmuster geprägt, durch »Präideen«, wie Fleck sie nannte. Diesem Zusammenhang ist vor allem Gerald Holton nachgegangen. In seinen Arbeiten zur Geschichte der Physik hat Holton gezeigt, in welchem Ausmaß das Denken der Wissenschaftler durch sog. 'Themata' geleitet wird, durch tiefe vorgefaßte Anschauungen, die in Holtons Sicht ihren Ursprung zum einen in biographischen Erfahrungen haben (und insofern individuell geprägt sind), zum andren aber auch dem soziokulturellen Umfeld des Forschers entstammen (Holton 1981). Solche 'Themata', die das Denken der Wissenschaftler prägen und ihr Forschungshandeln leiten, sind in der Physik z.B. Begriffe wie Diskretheit (versus Kontinuität), Einfachheit (versus Komplexität), Konstanz (versus Evolution) etc. Während Holton eine eher individualistische Sicht verficht, indem er die Themata zum einen in den individuellen Köpfen der einzelnen Wissenschaftler verankert und ihre Entstehung zum andren primär auf Sozialisationserfahrungen zurückführt, läßt sich mit ebenso guten Gründen eine stärker soziologisch orientierte Perspektive vertreten, wie das, wenn auch in anderer Terminologie, vor allem Ludwik Fleck getan hat. Ich komme in Kapitel 4 darauf zurück.

(3) Während das Diskursmodell die Ebene der empirischen Faktizität nur am Rande problematisiert, wird diese im *konstruktivistischen Laborstudien-Ansatz* zum Hauptthema gemacht: Beobachtungen sind nicht nur theorieabhängig, sie sind auch fabriziert. D.h. im Unterschied zu den konsenstheoretisch orientierten Arbeiten, in denen die Frage der Interpretation von Beobachtungen im Vordergrund steht, nicht aber deren *Entstehung*, ist es genau dieses Problem, das die konstruktivistische Wissenschaftssoziologie ins Zentrum stellt.[22] Die konstruktivistische Wissenschaftssoziologie geht, so Karin Knorr-Cetinas programmatische Erklärung in ihrer dichten Studie *Die Fabrikation von Erkenntnis*, davon aus, »daß der Experimentator als kausale Ursache der erhaltenen Ereignisfolge gesehen werden muß und daß die Ereigniszusammenhänge als von uns geschaffen – und nicht als einfach gegeben – zu betrachten sind (...) In der vorliegenden Arbeit wird das Problem der Faktizität als Problem der Fabrikation von Wissen formuliert. Damit ist auf einen Wissensbegriff abgezielt, der naturwissenschaftliche Resultate nicht nur als historisch-sozial eingebettet ansieht, sondern auch als konkret im Labor *konstruiert.*« (Knorr-Cetina 1984: 21f.)

Die Welt der Tatsachen erscheint in dieser Sicht als Produkt systemspezifischer Handlungen. Die moderne Naturwissenschaft sieht sich nicht einer ihr äußerlichen, objektiv gegebenen, sondern einer von ihr selbst

22 Vgl. Knorr-Cetina 1989 zur Unterscheidung verschiedener Varianten von 'Konstruktivismus'.

geschaffenen, gewissermaßen 'zweiten' Natur gegenüber. Natur wird, anders formuliert, nicht einfach beobachtet, sondern instrumentell (via Instrumente, Apparate) hergestellt. Die moderne Wissenschaft erzeugt die Tatsachen, die sie beschreibt, selbst. Sie arbeitet, wie Rudolf Stichweh in der Diktion der Luhmannschen Systemtheorie schreibt, »von vornherein nur mit Elementen der Erkenntnis, die sie nach ihren eigenen Regeln selbst produziert hat« (Stichweh 1988: 685). Indem sie »alle Wissensbestandteile und damit alle Elementarphänomene, auf denen sie aufruht und die sie weiter ausarbeitet, mit Hilfe ihrer Instrumente und darauf bezogener Interpretationen selbst hervorbringt«, ist sie – zumindest aus der Perspektive der neueren Systemtheorie – ein 'autopoietisches' System (Stichweh 1988: 693).[23]

Im konstruktivistischen Modell, so wie es vor allem Karin Knorr-Cetina vertritt, präsentiert sich Wissenschaft nicht mehr bloß »as an interpretative enterprise« (Mulkay 1979a: 95), sondern sehr viel radikaler noch als »Konstruktionsmaschinerie«. Was als 'natürliches' Phänomen erscheint, als problemloses 'Datum', ist das Ergebnis eines mehrstufigen Fabrikations- bzw. Selektionsprozesses, in dessen Verlauf auf verschiedenen Ebenen Entscheidungen getroffen und gemeinsame Deutungen ausgehandelt werden. Wie rational und universell die Entscheidungskriterien sind und wie 'herrschaftsfrei' der Prozeß der Meinungsbildung verläuft, das sind Fragen, auf die die neuere Wissenschaftssoziologie eine *empirische* Antwort sucht.[24] Im Gegensatz zum Interessenmodell, das letztlich klar zwischen einer kognitiven bzw. technischen Dimension auf der einen und einer sozialen auf der anderen Seite unterscheidet, wird genau diese Aussonderung im konstruktivistischen Modell zum Thema gemacht. Ihr 'a-sozialer' Charakter ist der Wissenschaft nicht durch ihren Gegen-

23 Das gilt allerdings erst für die moderne Wissenschaft, wie sie sich seit dem frühen 19. Jahrhundert entwickelt hat. Die Elektrizitätslehre ist für Stichweh die erste Disziplin, in der Wissen nicht mehr nur repräsentiert, sondern selbst hervorgebracht wird. »In diesem Sinne ist sie (die Wissenschaft des frühen 19. Jahrhunderts, B.H.) erstmals autopoietische Wissenschaft, weil sie nicht mehr die Elemente des Wissens aus der Umwelt und aus einer vorwissenschaftlichen Vergangenheit übernimmt, um diesen dann lediglich eine wissenschaftseigene Struktur aufzuerlegen. An die Stelle der Übernahme von Elementen aus der Umwelt tritt das Phänomen, daß die Wissenschaft (...) alle Elemente, aus denen sie besteht, selbst *produziert*.« (Stichweh 1987: 453) Dies gilt, wie ich in Kapitel 1 ausführlich dargestellt habe, erst recht für die moderne Mathematik.

24 Womit sie sich freilich genau in jenen wissenschaftstheoretischen Annahmen verfängt, die sie an sich kritisiert. Zu diesem 'Reflexivitätsproblem' der Wissenssoziologie vgl. u.a. den von Steve Woolgar 1988 herausgegebenen Sammelband.

standsbereich aufgezwungen, sondern selbst Resultat der Definitionsleistungen der beteiligten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen. Der Konstruktivismus, so Karin Knorr-Cetina, »leugnet nicht die Relevanz von 'Naturphänomenen' in der Wissenschaft. Er versucht vielmehr zu zeigen, wie diese 'Phänomene' als 'unabhängige' und 'natürliche', d.h. als zu einer anderen als der Sozialordnung gehörige, im Wissenschaftsbetrieb konstituiert werden. Der Konstruktivismus beschreibt den Konstruktionsapparat, aus dem Realität 'wie sie wirklich ist', hervorgeht.« (Knorr-Cetina 1988: 86)[25]

## 2. Die soziale Konstruktion der Mathematik

> I believe that mathematical reality lies outside us, that our function is to discover or observe it, and that the theorems which we prove, and which we describe grandiloquently as our 'creations', are simply our notes of our observations.
>
> *G.H. Hardy*[26]

> A proof only becomes a proof after the social act of 'accepting him as a proof'.
>
> *Y. I. Manin*[27]

Die neue Wissenschaftssoziologie ist mit dem Anspruch angetreten, auch die 'harten' Wissenschaften einer wissenssoziologischen Analyse zu erschließen. Während sie diesen Anspruch für die Naturwissenschaften zumindest teilweise eingelöst hat, gibt es kaum Arbeiten zu einer Wissenssoziologie der *Mathematik*.[28] Michael Mulkay stellt in seiner an sich

25 Auch die konstruktivistische Position ist nicht unbestritten geblieben. Ähnlich wie beim Interessen- und Diskursmodell bezieht sich die Kritik auch hier vor allem (1) auf die relativistische Tendenz dieser Position, (2) auf die Behauptung einer Kontextualität (und Historizität) wissenschaftlicher Entscheidungs- und Rationalitätskriterien, und zusätzlich (3) auf die 'mikroskopische' Perspektive der Laborstudien, denen vorgeworfen wird, makrostrukturelle Zusammenhänge auszublenden. Vgl. dazu die in Anm. 19, S. 134 aufgeführte Literatur sowie Nowotny 1982; Gad Freudenthal 1984.

26 Hardy 1940: 63f.

27 Manin 1979: 17.

28 Eine Ausnahme ist David Bloor, der in verschiedenen Arbeiten versucht hat, eine sich an Wittgenstein orientierende Wissenssoziologie der Mathematik zu entwickeln; vgl. Bloor 1973; Bloor 1976, insb. Kap. 5 – 7; Bloor 1983. Davon abgesehen sind mathematiksoziologische Arbeiten, die in der Tradition der neueren Wissenschaftssoziologie stehen, an einer Hand abzuzählen; vgl. etwa MacKenzie/Barnes 1975 (wissenschaftliche Kontroversen); Pinch 1977 (interpretative Flexibilität von mathematischen Objekten); Barnes/Law 1976 (Indexalität mathematischer Begriffe). Eine

sehr informativen Monographie zwar die Behauptung auf, daß die Einsichten der neueren Wissenschaftssoziologie auch auf die Mathematik übertragbar seien, den Beweis dafür bleibt er aber schuldig. Seine Ausführungen zur Mathematik beschränken sich auf die Feststellung, daß es falsch sei anzunehmen, »that 'non-empirical' disciplines develop quite differently or that their knowledge has a certainty or clarity different in kind from that of empirical science. In other words, we cannot retain the category of 'special case' traditionally used by sociologists of knowledge by confining its scope to mathematics and logic.« (Mulkay 1979a: 92)

Diese Leerstelle, was die Mathematik betrifft, kommt nicht von ungefähr. Denn auf den ersten Blick scheint sich die Mathematik einer wissenssoziologischen Analyse mit noch viel besseren Gründen entziehen zu können, als es bei den Naturwissenschaften der Fall war. In der Mathematik scheint es keine Kontingenz zu geben und damit auch keinen Gegenstand wissenssoziologischer Analyse. So gehört z.B. für Larry Laudan das Wissen darum, daß '2 + 2 = 4', zu jenen Wissensinhalten, die prinzipiell keiner soziologischen Erklärung zugänglich sind: »There is an enormous amount of evidence which shows that certain doctrines and ideas bear no straightforward relation to the exigencies of social circumstances: to cite but two examples, the principle that '2 + 2 = 4' or the ideas that 'most heavy bodies fall downwards when released' are beliefs to which persons from a wide variety of cultural and social situations subscribe. Anyone who would suggest that such beliefs were socially determined or conditioned would betray remarkable ignorance of the ways in which such beliefs were generated and established.« (Zit. in Barnes 1979: 259) Wer einmal gelernt hat, wie man Zahlen multipliziert, wird beim Nachrechnen von '17 x 33 = 564' unschwer feststellen, daß das Resultat falsch ist, unabhängig davon in welcher Kultur er lebt, was er arbeitet und wo er politisch steht.[29]

Dasselbe trifft, zumindest der herrschenden Meinung zufolge, auch für Beweise zu. Ein formaler Beweis ist eine Abfolge von Formeln, die im Prinzip so mechanisch hergeleitet werden können, daß, wie Alan Turing überzeugend dargelegt hat, sogar eine Turingmaschine (oder ein Com-

systematische und umfassende wissenssoziologische Behandlung der Mathematik (als Wissenschaft) gibt es meines Wissens bislang noch nicht.

29 Daß bereits beim einfachen Rechnen Soziales – genauer: Normatives – im Spiel ist, das hat gegen die Position, wie sie stellvertretend für viele Larry Laudan vertritt, vor allem Ludwig Wittgenstein zu zeigen versucht. Vgl. zu Wittgensteins Soziologie der Mathematik vor allem die Arbeiten von Bloor (Anm. 28, S. 140).

puter) dazu imstande ist. Formales Beweisen hat nichts mit inhaltlichen Überlegungen zu tun. Es ist, wie Hilbert schreibt, ein »äußeres Handeln nach Regeln« (Hilbert 1925: 95). Aber ist das wirklich so? Ist das Beweisen eines Satzes tatsächlich eine rein mechanische Angelegenheit? Ist ein korrekt durchgeführter Beweis wirklich so unbestreitbar wie eine einfache Multiplikation? Und schließlich: Wer befindet darüber, ob ein Beweis korrekt ist?

In seiner berühmten Monographie *Beweise und Widerlegungen* hat Imre Lakatos genau diese, wie er sie nannte, 'Unfehlbarkeitsphilosophie' der Mathematik infrage gestellt. Die Arbeit entstand als Dissertation bei Karl Popper und wurde 1963/64 in Form von vier Artikeln in *The British Journal for the Philosophy of Science* veröffentlicht (Lakatos 1963). *Beweise und Widerlegungen* ist keine konventionelle Monographie. Lakatos greift in diesem Buch einen berühmten Beweis aus der Geschichte der Mathematik auf, den Beweis der Eulerschen Formel für Polyeder durch A.L. Cauchy (1813), und gibt ihm und seiner Folgegeschichte die Form einer Auseinandersetzung in einer fiktiven Schulklasse. Lakatos' Buch ist eine Ehrenrettung der inhaltlichen Mathematik und gleichzeitig eine fulminante Kritik am Formalismus. Es richtet sich gegen die Annahme einer Unfehlbarkeit mathematischer Schlüsse – und damit auch ganz direkt gegen das grundlagentheoretische Projekt, der Mathematik ein für allemal eine sichere Basis zu geben (vgl. Kap. 1).

Mit seinem Buch eröffnet Lakatos einen neuen Zugang zur Philosophie (und Soziologie) der Mathematik, indem er dem Glauben an die prinzipielle Sicherungsfähigkeit der Mathematik eine 'empiristische' Konzeption entgegenstellt. Im Gegensatz zur Auffassung, wie sie Bertrand Russell, David Hilbert und L.E.J. Brouwer trotz aller Differenzen gemeinsam war, rekonstruiert Lakatos die Geschichte der Mathematik als eine Geschichte von Vermutungen und Widerlegungen – ganz im Sinne von Poppers kritischem Rationalismus.[30] »Der Kern dieser Fallstudie«, so Lakatos' Absichtserklärung im Vorwort zu seiner Arbeit, »wird den mathematischen Formalismus herausfordern, aber er wird nicht unmittelbar die letzten Positionen des mathematischen Dogmatismus angreifen. Ihr bescheidenes Ziel ist es herauszuarbeiten, daß inhaltliche, quasi-empirische Mathematik nicht durch die andauernde Vermehrung der Zahl unbezweifelbar begründeter Sätze wächst, sondern durch die unaufhörliche

30 Popper selbst ist nicht so weit gegangen, und dies wirft Lakatos ihm auch vor. Popper habe trotz seiner »fehlbaren Philosophie« den Fehler begangen, »der Mathematik einen bevorrechtigten Rang der Unfehlbarkeit einzuräumen« (Lakatos 1963: 131).

Verbesserung von Vermutungen durch Spekulation und Kritik, durch die Logik der Beweise und Widerlegungen.« (Lakatos 1963: xii)[31]

Die Mathematik ist 'fehlbar' wie die anderen Wissenschaften auch. Das ist die Kernaussage von Lakatos' Auffassung der Mathematik. Ein Beweis ist im Prinzip immer nur 'wahr' auf Zeit. Er verkörpert keine ewige Wahrheit, sondern einen (komplexen) Geltungsanspruch, der bestritten werden kann, mit Hilfe von Gegenbeweisen und vor allem mit Hilfe von Gegenbeispielen. In Lakatos' fiktiver Schulklasse sind Beweise nicht zweifelsfreie Fakten, sondern Gegenstand von Kontroversen. Die Schülerinnen und Schüler nehmen verschiedene Positionen ein, bringen verschiedene Interpretationen vor und versuchen einander durch Gegenbeweise und Gegenbeispiele zu überzeugen. Neue Beweise erklären alte Gegenbeispiele; neue Gegenbeispiele stellen alte Beweise infrage. Gegenbeispiele können sich entweder auf einzelne Beweisschritte beziehen oder aber die Schlußfolgerung insgesamt infrage stellen. Im einen Fall spricht Lakatos von 'lokalen', im anderen Fall von 'globalen' Gegenbeispielen.

Gegenbeispiele, das macht die Diskussion in Lakatos' Klassenzimmer deutlich, führen dazu, daß Beweise präzisiert und Begriffe differenziert werden. »Aber ich kann den Beweis«, so etwa die Antwort des Lehrers auf das (lokale) Gegenbeispiel eines Schülers, »sehr einfach ausarbeiten, meinen Beweis verbessern, indem ich den falschen Hilfssatz durch einen leicht abgeänderten ersetze, den Dein Gegenbeispiel nicht widerlegt.« (Lakatos 1963: 6) Ein Beweis ist für Lakatos keine unverrückbare Wahrheit, sondern ein *Begründungsversuch*, seine Funktion ist primär Rechtfertigung und Erklärung, nicht das Aufdecken einer ewigen Wahrheit. Was Lakatos am Beispiel seiner fiktiven Schulklasse vorführt, kennzeichnet seiner Meinung nach die Entwicklung der gesamten Mathematik. Mathematik entsteht und verändert sich in einem Hin und Her von Vermutung und Kritik, von 'Beweis und Widerlegung'. Was einmal als gesichert galt, kann zu einem späteren Zeitpunkt angezweifelt oder zumindest auf seine Randbedingungen hin befragt werden. Falsifikation in der Mathematik, das macht Lakatos mit seiner doppelten[32] Rekonstruktion der Beweisgeschichte der Eulerschen Formel deutlich, bezieht sich aller-

31 Zu Lakatos' Auffassung der Mathematik vgl. vor allem die umfassende Darstellung von Koetsier 1991. Kurze Einführungen geben auch Hersh 1978 sowie diverse Aufsätze in Cohen u.a. 1976.

32 'Doppelt' insofern als Lakatos die Beweisgeschichte der Eulerschen Formel am Beispiel seiner Klassenzimmer-Diskussion darstellt und sie gleichzeitig in den Fußnoten auf konventionelle Weise rekonstruiert.

dings weniger auf den Inhalt mathematischer Sätze als vielmehr auf ihren Gültigkeitsbereich. Oder wie es Teun Koetsier formuliert: »Mathematical theories are weakly fallible in the sense that one can never exclude the occurrence of unintended possible interpretations of fundamental notions that require a restriction of universality claims by means of conceptual refinement. Because only the range of validity of theories is restricted weak fallibility implies far going continuity.« (Koetsier 1991: 278)

Mathematik ist in den Augen von Lakatos eine *quasi-empirische* Wissenschaft. 'Quasi-empirisch' nennt er Theorien, bei denen – im Gegensatz zu 'Euklidschen' Theorien – Wahrheit nicht von oben (d.h. von den Axiomen) nach unten übertragen wird, sondern umgekehrt von unten nach oben. Im Zentrum quasi-empirischer Theorien steht die Erklärung (und nicht der Beweis), die Vermutung (und nicht die Gewißheit). »Whether a deductive system is Euclidean or quasi-empirical is decided by the pattern of truth value flow in the system. The system is Euclidean if the characteristic flow is the transmission of truth from the set of axioms 'downwards' to the rest of the system – logic here is an organon of proof; it is quasi-empirical if the characteristic flow is retransmission of falsity from the false basic statements 'upwards' towards the 'hypothesis' – logic here is an organon of criticism.« (Lakatos 1967: 29) 'Quasi-empirisch' meint freilich nicht 'empirisch' im üblichen Sinn. Wie das Beispiel der Mathematik zeigt, muß das Fundament quasi-empirischer Theorien nicht unbedingt aus raum-zeitfixierten Basissätzen bestehen. Quasi-empirische Theorien können auch nicht-empirische Theorien sein.

Mit seiner Einstufung der Mathematik als quasi-empirische Theorie befindet sich Lakatos, wie er triumphierend vorführt, in der guten Gesellschaft des mathematischen Establishments. Während die Mathematik bis zu Beginn dieses Jahrhunderts als Prototyp einer 'Eudklidschen' Theorie galt, haben die um diese Zeit entdeckten Widersprüche – und vor allem das Unvermögen, sie ein für allemal ausmerzen – viele Mathematiker zu einem quasi-empirischen Standpunkt geführt. Logizismus und Formalismus waren in den Augen von Lakatos der letzte, jedoch gescheiterte Versuch, die Mathematik im Rahmen einer Euklidschen Theorie zu reformulieren.[33] Heute geht die Mehrheitsmeinung, das will Lakatos mit seinen Beispielen demonstrieren, in Richtung von Empirismus und Induktionismus. Weshalb sollte die Mathematik als einzige Disziplin abso-

33 Ob diese Zuordnung zutreffend ist, darüber kann man sich, gerade was die Hilbertsche Metamathematik anbelangt, mit guten Gründen streiten; vgl. dazu auch die kritische Anmerkung der Herausgeber in Lakatos 1967: 32.

lute Gewißheit für sich beanspruchen, fragt z.B. Haskell B. Curry. »In no other science do we make such demands. In physics all theorems are hypothetical; we adopt a theory so long as it makes useful predictions and modify or discard it as soon as it does not. This is what happened to mathematical theories in the past, where the discovery of contradictions had led to modifications in the mathematical doctrines accepted up to the time of that discovery. Why should we not do the same in the future?» (Zit. in Lakatos 1967: 25)

Die Mathematik ist eine 'quasi-empirische' Theorie wie die Theorien der Naturwissenschaft, und sie ist wie diese immer nur gültig auf Zeit, wahr nur auf Widerruf. Sie ist eine Wissenschaft, so wie sie Popper konzipiert hatte, und ihr Entwicklungsmotor ist inhaltliche Argumentation – und nicht die Mechanik des mathematischen Formalismus. Poppers Doktrin der Falsifizierbarkeit von Theorien, an der sich Lakatos orientiert, setzt jedoch eine wie auch immer geartete äußere, objektive Welt voraus, anhand derer Theorien beurteilt werden können. Während sich diese Welt im Falle der Naturwissenschaft relativ problemlos als 'Natur' bestimmen läßt (zumindest in den Augen eines kritischen Rationalisten), ist es im Falle der Mathematik keineswegs ausgemacht, was hier die 'potentiellen Falsifikatoren' sein könnten.

In seiner Monographie spricht Lakatos dieses für seine These zentrale Problem erstaunlicherweise nicht einmal an. Erst in seinem einige Jahre später geschriebenen Aufsatz *A renaissance of empiricism in the recent philosophy of mathematics?*, den er allerdings nie publizierte, kommt er explizit auf diese Frage zu sprechen: »If mathematics and science are both quasi-empirical, the crucial difference between them, if any, must be in the nature of their 'basic statements' or 'potential falsifiers'. The 'nature' of a quasi-empirical theory is decided by the nature of the truth value injections into its potential falsifiers. Now nobody will claim that mathematics is empirical in the sense that its potential falsifiers are singular spatio-temporal statements. But then what is the nature of mathematics? Or, what is the nature of the potential falsifiers of mathematical theories?« (Lakatos 1967: 35)

Was also ist die 'Natur' der Mathematik? Was sind ihre potentiellen Falsifikatoren? Wodurch wird ein mathematischer Satz falsifiziert? Lakatos' Antwort auf diese Frage fällt zweideutig aus. Im Falle der formalistischen Mathematik sind genau genommen nur *logische* Falsifikationen denkbar. Im Hilbertschen Formalismus ist die Mathematik von allen 'ontologischen Vorbehalten' (Mehrtens) befreit. Die Dinge, mit denen sich die Mathematiker beschäftigen, haben keinen Bezug mehr zu einer wie auch immer gearteten Außenwelt, sondern werden implizit definiert über die im Prinzip frei gesetzten Axiome. Existenz hat, was den Axiomen nicht widerspricht. »Wenn sich die willkürlich gesetzten Axiome nicht einander widersprechen mit sämtlichen Folgen«, so David Hilbert in dem bereits zitierten Brief an Gottlob Frege, »so existieren die durch die Axiome definirten Dinge. Das ist für mich das Criterium der Wahrheit und Existenz.« (Hilbert an Frege, in Frege 1976: 66)

Im Hilbertschen Formalismus erzeugt die Mathematik ihre Gegenstände selbst. Es gibt mit anderen Worten keine unabhängige 'Außenwelt', an der die Sätze der Mathematik gemessen werden könnten. Das ist der Grund, weshalb als potentielle Falsifikatoren höchstens logische Widersprüche in Frage kommen, »statements of the form p & ¬p«, nicht aber systemunabhängige 'Fakten' wie im Falle der Naturwissenschaft (Lakatos 1967: 36). Dennoch – trotz dieses hoch selbstreferentiellen und autarken Charakters der formalistischen Mathematik – führt Lakatos noch ein zweites Falsifikationskriterium ein, nämlich die inhaltliche Theorie. »If we accept the view that a formal axiomatic theory implicitly defines its subject-matter, then there would be no mathematical falsifiers except the logical ones. But if we insist that a formal theory should be the formalization of some informal theory, then a formal theory may be said to be 'refuted' if one of its theorems is negated by the corresponding theorem of the informal theory. One could call such an informal theorem a *heuristic falsifier* of the formal theory.« (Lakatos 1967: 36) Es sind also in Lakatos' Sicht die Theoreme der inhaltlichen Mathematik, die den Status von (potentiell falsifizierenden) 'Fakten' haben.[34]

Abgesehen von der nicht unproblematischen (und zudem normativ gefärbten) Behauptung, daß eine formale Theorie immer die Kodifikation einer inhaltlichen sei, hat Lakatos mit seiner Idee der 'heuristic falsifiers' das Problem bloß verschoben (und nicht gelöst), nämlich auf die Frage: Was sind die potentiellen Falsifikatoren einer *inhaltlichen* mathematischen Theorie? Auf diese grundlegende Frage bleibt Lakatos eine Ant-

34 Dies läßt sich an einem Beispiel veranschaulichen. Man stelle sich vor, eine inhaltliche mathematische Theorie sei vollständig formalisiert. Nun ist es im Prinzip denkbar, daß irgendwann ein inhaltlicher mathematischer Satz bewiesen wird, der einer Formel der formalen Theorie widerspricht. Wenn der Beweis formalisiert werden kann, ist die formale Theorie offensichtlich widersprüchlich: sie wurde durch den formalisierten Beweis *logisch* falsifiziert. Falls sich der Beweis nicht formalisieren läßt, so ist die formale Theorie in den Augen von Lakatos falsch: sie wurde durch den inhaltlichen Beweis *heuristisch* falsifiziert (Lakatos 1967: 37).

wort schuldig. Er begnügt sich damit, eine Reihe von Hypothesen anzuführen, die jedoch nur noch einmal die bekannten mathematikphilosophischen Standpunkte wiederholen: »Are we going to arrive, tracing back problemshifts through informal mathematical theories to empirical theories, so that mathematics will turn out in the end to be indirectly empirical (...)? Or is construction the only source of truth to be injected into a mathematical basic statement? Or platonistic intuition? Or convention? The answer will scarcely be a monolithic one.« (Lakatos 1967: 40f.)

Das offensichtliche Unvermögen von Lakatos, 'objektive' mathematische Falsifikatoren anzugeben, könnte darauf hinweisen, daß es diese eben nicht gibt.[35] Die Mathematik entwickelt sich, wie Lakatos mit seiner Schulzimmer-Diskussion exemplarisch vorführt, in einem komplexen Prozeß von Mutmaßung und Widerlegung, von 'conjectures and refutations'. Auch ein Beweis ist zunächst einmal nur eine Behauptung, deren Geltungsanspruch überprüft und bestritten werden kann. Doch die Beurteilungskriterien sind nicht, wie Lakatos es gerne haben wollte, objektive Falsifikatoren – gewissermaßen funktionale Äquivalente zu Poppers Basissätzen. Die Kritik der neueren Wissenschaftsphilosophie am Popperschen Falsifikationismus schließt Lakatos' mathematische Variante mit ein. Was für die Naturwissenschaften gilt, trifft im Prinzip auch für die Mathematik zu: Was als mathematisches Wissen tradiert wird und den Status einer Lehrbuchmeinung bekommt, hat zuvor einen Aushandlungsprozeß durchlaufen, dem auch soziale Dimensionen eigen sind. Oder wie es der Logiker Yu I. Manin formuliert: »A proof only becomes a proof after the *social act* of 'accepting him as a proof'.« (Manin 1979: 17)[36]

---

35 Zu diesem Schluß scheint auch Lakatos selbst gekommen zu sein. Er hat jedenfalls seine Arbeit nie publiziert. Statt dessen begann er im Anschluß daran seine bereits erwähnte 'Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme' zu entwickeln (vgl. S. 124). Die darin enthaltenen Vorstellungen, mit denen er sich auch etwas vom Popperschen Falsifikationsmodell distanzierte, hat er allerdings nie systematisch auf die Mathematik angewandt. Möglicherweise, das ist zumindest die Ansicht von Teun Koetsier 1991, hätte er damit einige Probleme lösen können, die ihm sein relativ rigider Falsifikationismus eingetragen hatte. Dabei ist jedoch zu beachten, daß sich Lakatos' 'Methodologie der Forschungsprogramme' auf eine andere Ebene bezieht als jene, die er in seiner Monographie anspricht. Im Falle von *Beweise und Widerlegungen* handelt es sich um die Mikroebene der täglichen Arbeit des einzelnen 'working mathematician', die 'Methodologie der Forschungsprogramme' ist dagegen auf der Makroebene der Forschungs- und Theorietraditionen angesiedelt.

36 Manins Überlegungen zum Beweis in der Mathematik sind ursprünglich Teil eines Buches zur mathematischen Logik. Daß einer der Ihrigen – und nicht ein exotischer Wissenschaftssoziologe – auf solch radikale Aussagen kam, schien die Redaktion des *Mathematical Intelligencer* so erstaunt zu haben, daß sie sich entschloß, Manins »provocative digression on proof« abzudrucken.

Überträgt man die Sichtweise der neueren Wissenschaftssoziologie auf die Mathematik, so muß Lakatos' Modell modifiziert werden. Bevor ein Beweis allgemein akzeptiert ist, durchläuft er einen Prozeß von 'conjectures and refutations' – er wird, in der Terminologie der neueren Wissenschaftssoziologie, 'ausgehandelt', 'negotiated', ganz ähnlich wie ein Experiment oder eine Hypothese in der Naturwissenschaft. Auch in der Mathematik gibt es keine kontextunabhängigen, ahistorischen Außenkriterien, auf die zurückgegriffen werden kann, um die Gültigkeit eines Beweises ein für allemal zu beurteilen. Die intuitionistische Ablehnung des *tertium non datur* – und damit einer populären Beweisstrategie – ist dafür nur ein Beispiel (vgl. S. 36). Die Kriterien – um mit ihnen der Gegenstand, den es zu beurteilen gilt –, werden in einem unter Umständen sehr langen Prozeß entwickelt, gedeutet, bestätigt, uminterpretiert und vielleicht auch revidiert.

Das heißt natürlich nicht, daß es nicht auch Kriterien gibt, die über die Zeit hinweg praktisch stabil sind. Dies gilt z.B. für das Kriterium der Überprüfbarkeit – zumindest bis vor kurzem. Obschon normativer Anspruch und alltägliche Praxis auch schon früher nicht unbedingt deckungsgleich waren (nicht jeder publizierte Beweis wird vorgängig bis ins Detail überprüft), hat das Kriterium der Überprüfbarkeit von Beweisen erst mit dem Aufkommen von Computerbeweisen seine Fraglosigkeit verloren (vgl. u.a. Tymoczko 1979). Computerbeweise sind aus Zeitgründen oft nicht überprüfbar (höchstens von anderen Computern). Das berühmteste Beispiel dafür ist der Appel-Haken-Beweis (1976), der eine Rechnerleistung von 1200 Stunden erforderte. Ist der Appel-Haken-Beweis nun ein echter Beweis oder sind Computerbeweise, die nicht überprüfbar sind, keine wirklichen Beweise? Je nach Verlauf dieser Debatte wird sich am Ende vielleicht ein wichtiges Akzeptanzkriterium für Beweise geändert haben.

Wissenschaft ist ein 'interpretatives Geschäft' (Mulkay), und das gilt auch für die Mathematik. Mathematisches Wissen ist nicht einfach 'wahres', sondern von der wissenschaftlichen Gemeinschaft *akzeptiertes* – oder besser: 'ausgehandeltes' – Wissen. Entsprechend ist das Ergebnis – der wissenschaftliche Konsens – immer auch durch seine 'soziale Herkunft' mit geprägt, durch die interne Struktur der mathematischen Gemeinschaft und durch das außerwissenschaftliche kulturelle Umfeld, in das sie eingebettet ist. Ein Beispiel dafür ist die Rezeption von Kurt Gödels Unvollständigkeitsbeweis (Dawson 1988; Grattan-Guiness 1979; Moore 1991). Von heute aus gesehen hat Gödels Beweis den Status einer 'mathematischen Tatsache' – »*now* it seems clear and compelling« (Dawson 1988: 75). Dies war freilich nicht immer so. Der Beweis, den Gödel im September 1930 auf einer Tagung in Königsberg angekündigt hatte und einige Monate später publizierte, wurde zunächst kaum beachtet. An der Tagung selbst löste er keinerlei Diskussion aus, und auch in den Tagungsberichten wird er nirgends erwähnt. Dies ist um so erstaunlicher, als Gödels Beweis aus heutiger Sicht zu den wichtigsten Beweisen dieses Jahrhunderts gehört und sich die Tagungsteilnehmer aus hochkarätigen und an Grundlagenfragen interessierten Mathematikern zusammensetzten.

Für die laue Reaktion auf Gödels Beweis mag es verschiedene Gründe gegeben haben. Zum einen war Gödel damals noch sehr jung und völlig unbekannt. Entsprechend gering war auch die Aufmerksamkeit, die man ihm schenkte. Zum anderen mußte die Bedeutung des Beweises zuerst einmal erkannt werden. Nur die wenigsten Mathematiker schienen den Beweis auf Anhieb verstanden und die Bedeutung, die er für Hilberts beweistheoretisches Programm hatte, erkannt zu haben (eine Ausnahme war John von Neumann). Viele schrieben Gödel mit der Bitte, ihnen seinen Beweis zu erklären. Dazu gehörten auch David Hilbert (bzw. stellvertretend für ihn Paul Bernays) und Ernst Zermelo. Daß es bei diesen Anfragen um mehr als um bloß technische Verständnisfragen ging, illustriert das Dankesschreiben von Zermelo, nachdem ihm Gödel in einem längeren Brief seine Beweisidee noch einmal erklärt hatte: »Ich danke Ihnen für Ihren freundlichen Brief, aus dem ich nun besser als aus Ihrer Abhandlung und ihrem Vortrag entnehmen kann, wie Sie es eigentlich meinen.« (Zit. in Grattan-Guiness 1979: 302)

Nicht alle Mathematiker ließen sich allerdings überzeugen. Wie Dawson 1988 zeigt, war die Akzeptanz von Gödels Beweis bei den Formalisten um einiges größer als bei den 'inhaltlichen' Mathematikern, trotz der negativen Implikationen, die er für den Formalismus hatte.[37] Paul Finsler z.B., der 1926 zu einem ähnlichen Schluß gelangt war wie Gödel, allerdings auf inhaltlichem Wege (vgl. S. 64), bestritt noch 1944 die Aussagekraft des Gödelschen Beweises (Finsler 1944) – und umgekehrt wurde Finslers Beweis von Gödel als »obvious nonsense» qualifi-

37 Zur Akzeptanz hat auch die Tatsache beigetragen, daß sich Hilbert ausführlich, wenn auch nicht unbedingt freudig, mit Gödels Beweis auseinandergesetzt hat (Hilbert/Bernays 1939). Allein der Umstand, daß ein so renommierter Mathematiker wie Hilbert ihn einer Diskussion für würdig erachtete, hat ihn vermutlich aus dem Alltagsgeschäft der Mathematik herausgehoben.

ziert (zit. in Dawson 1988: 83). Daß Finsler Gödels Beweis die Beweiskraft absprach (und sich Gödel über Finslers Beweis bloß mokierte), hat seinen Grund in ihrer unterschiedlichen methodologischen Orientierung. Gödel war ein Vertreter des Formalismus, Finsler ein Verfechter der klassischen inhaltlichen Mathematik.[38] Die Tatsache, daß sich der Formalismus gerade zu dieser Zeit als herrschende Auffassung etablierte, mag deshalb zum Erfolg von Gödels Beweis wesentlich beigetragen haben. Bevor Gödels Beweis zu einer 'mathematischen Tatsache' werden konnte, mußte also die mathematische Gemeinschaft – in Vorlesungen, Vorträgen und direkten Gesprächen – von ihm überzeugt und in gewissem Sinne 'sozialisiert' werden. Erst nachdem dies geschehen war – und wie gut dies gelang, war abhängig davon, an welchem 'Forschungsprogramm' sich die einzelnen Mathematiker orientierten –, hat Gödels Beweis die Beweiskraft bekommen, die er heute besitzt.

Die Verabschiedung der Idee 'objektiver' Falsifikatoren, die Lakatos noch zu retten suchte, bedeutet freilich nicht, daß damit auch die Vorstellung wissenschaftlicher Rationalität aufgegeben wird. Vielmehr ist, wie bereits Karl Mannheim skizziert hat und Jürgen Habermas mit seinem Begriff der 'kommunikativen Rationalität' systematisch begründet, Rationalität im (wissenschaftlichen) Diskurs selbst angelegt. Rationalität ist der Rede, dem Sprechen inhärent. Wer kommunikativ handelt, wer sich verständigt, handelt – willentlich oder nicht – auch rational. Das ist die Kernthese von Habermas' Theorie kommunikativen Handelns, die er über eine formale Analyse der universellen Voraussetzungen und allgemeinen Eigenschaften der Sprachverwendung zu plausibilisieren versucht. Jede Äußerung ist ein Vorschlag, der abgelehnt werden kann und je nach Bedarf begründet werden muß. Ein 'ja', ein Konsens also, beruht folglich immer auf Einsicht (und nie auf Zwang). Die Möglichkeit, 'nein' zu sagen, und die Verpflichtung, die eigene Äußerung je nachdem zu begründen, macht den rationalen Kern des Sprechens aus. Sie ist aus der Sicht von Habermas der Grund dafür, weshalb Rationalität der Kommunikation inhärent ist (Habermas 1981).

---

38 Ähnlich interpretiert auch Pinch 1977 die Verständigungsprobleme, die zwischen John von Neumann und David Bohm in Hinblick auf von Neumanns quantentheoretischen Beweis von 1932 auftraten. Kennzeichnend für die Kontroverse zwischen Bohm und von Neumann war weniger die Differenz ihrer Positionen als vielmehr das Unvermögen, einander überhaupt zu verstehen. Die Kontroverse zwischen Bohm und von Neumann ist in den Augen von Pinch nicht primär durch Dissens gekennzeichnet, sondern durch einen 'communication breakdown', der seinen Ursprung in den unterschiedlichen Orientierungswelten der beiden Kontrahenten hat.

Das kommunikative Handeln selbst beruht auf zwei Idealisierungen, die vorausgesetzt sein müssen, damit es überhaupt zu einem Diskurs kommen kann: auf der Annahme, daß Mißverständnisse, Uneinigkeiten im Prinzip argumentativ beseitigt werden können (indem man z.B. auf die Metaebene wechselt), sowie auf der Unterstellung, daß ein solcher Klärungsprozeß im Prinzip herrschaftsfrei verläuft. Habermas diskutiert diese letzte Idealisierung unter dem (oft mißverstandenen) Begriff der 'idealen Sprechsituation' bzw. des 'herrschaftsfreien Diskurses'. 'Herrschaftsfreier Diskurs' meint nicht ein empirisches Phänomen, sondern eine (notwendige und universelle) Unterstellung: »Die ideale Sprechsituation ist weder ein empirisches Phänomen noch bloßes Konstrukt, sondern eine in Diskursen unvermeidliche, reziprok vorgenommene Unterstellung (...), eine operativ wirksame Fiktion.« (Habermas 1973: 180)

Die Idee eines 'herrschaftsfreien Diskurses' ist zwar auch in der Wissenschaft nicht Realität, aber indem hier – zumindest vom Anspruch her – Raum geschaffen wird für argumentative Auseinandersetzung, für Behauptung, Widerrede und Begründung, sind die Voraussetzungen kommunikativer Rationalität im System der Wissenschaft noch am ehesten erfüllt. Das ist der Grund dafür, weshalb die neuere Wissenschaftssoziologie, die die (informelle) Kommunikation in den Vordergrund rückt, nicht in eine Haltung epistemologischer Beliebigkeit verfällt. Der Anspruch der Wissenschaft auf Rationalität wird von ihr nur anders begründet. Während im konventionellen Modell, wie es am prominentesten Robert Merton vertreten hat, die Rationalität der Wissenschaft über institutionalisierte wissenschaftliche Normen plausibilisiert wird, die dafür zu sorgen haben, daß die subjektiven und irrationalen Anteile am Erkenntnisprozeß möglichst ausgeschaltet sind, ist Rationalität aus der Sicht der neueren Wissenschaftssoziologie im kommunikativen Handeln selbst begründet. Geht man, wie Habermas, davon aus, daß Kommunikation per se einen rationalen Kern hat, dann beginnt zwar die scharfe Grenzlinie zwischen wissenschaftlicher und Alltagsrationalität zu verschwimmen (wenn auch nicht zu verschwinden), aber in Richtung einer Aufwertung alltagstheoretischer Vernunft (und nicht im Sinne einer Degradierung der wissenschaftlichen). Die Idee kommunikativer Rationalität steht in einem markanten Gegensatz zum 'Kontaminationsmodell', das das Soziale immer nur als irrationalen Störfaktor sehen kann. Die Tatsache, daß naturwissenschaftliche oder mathematische Ergebnisse immer einen Konsensbildungsprozeß durchlaufen, bevor sie den Status einer 'wissenschaftlichen Tatsache' erlangen, muß in dieser Perspektive nicht heißen, daß sie dadurch auch systematisch verzerrt werden.[39]

Auch in der Mathematik, und das gilt sogar für die 'harte' Ebene des mathematischen Beweises, lassen sich also – entgegen Mannheims Diktum – »Spuren menschlicher Herkunft« finden. Dies ergibt sich als Fazit, wenn man die Mathematik aus dem Blickwinkel der neueren Wissenschaftssoziologie betrachtet. Der Überblick in diesem Kapitel hatte die Funktion, dieser These etwas Kontur zu verleihen. Mein Anspruch ist allerdings bescheidener. Obschon man meiner Ansicht nach plausibel machen kann – Lakatos war dafür mein Kronzeuge –, daß die Rechtfertigung von Geltungsansprüchen sogar in der Mathematik ein sozial imprägnierter Prozeß ist, geht es mir im folgenden nur um den *context of discovery*. Die anschließenden Ausführungen beziehen sich mit anderen Worten nicht mehr auf die Frage, aufgrund welcher Prozesse ein Beweis als gültig akzeptiert wird, sondern setzen einen Schritt früher an – bei der Frage, welche Faktoren die *Entwicklung* von mathematischen Ideen beeinflussen. Oder etwas konkreter: bei der Frage, inwieweit zeitspezifische Erfahrungen und Deutungsmuster einen Einfluß haben auf die Fragen, die sich die Mathematiker stellen, und auf die Antworten, die sie darauf geben.

Der moderne Formalismus wurde in einer Zeit entwickelt, die von tiefgreifenden sozialen und kulturellen Umbrüchen geprägt war. Deutschland erlebte in diesen Jahren den Durchbruch der Moderne, nicht nur im Bereich der Kunst, auch im Bereich der Arbeit, der Technik und der sozialen Beziehungen. Läßt sich ein Zusammenhang nachweisen zwischen der Moderne in der Mathematik und der Modernisierung im soziokulturellen Bereich? Das ist die Frage, der ich im folgenden Kapitel 4 nachgehen möchte.

Die Diskussion um die Antinomien, die man Ende des 19. Jahrhunderts in der Mathematik entdeckt hatte, hat keinen gradlinigen Verlauf

---

39 Das heißt nicht, daß in der Wissenschaft immer und ausschließlich nur das 'gute Argument' zählt. Auch hier ist empirisch gesehen das Gewicht einer Äußerung mit beeinflußt von sozialen Faktoren – wie etwa wissenschaftlicher Reputation, Geschlecht, sozialer Status etc. – und für den Verlauf des Konsensbildungsprozesses spielen bekanntlich argumentative Tricks, Koalitionsbildungen etc. eine nicht unwesentliche Rolle. Gemeint ist bloß, daß die Norm, Handlungen über Kommunikation zu koordinieren (und nicht über sprachexterne Mittel bzw. Steuerungsmedien), vor allem und gerade in der Wissenschaft verankert ist. Ich komme auf diese Frage im Zusammenhang mit der Durchsetzung der Von-Neumann-Architektur zurück (Kap. 6).

genommen. Im allgemeinen war der Umgang mit ihnen pragmatisch bestimmt, aber es gab auch eine Zeit, in der die Mathematiker mit großer Unsicherheit und Unruhe auf sie reagierten. In Kapitel 5 versuche ich zu zeigen, daß dieser Einstellungswandel (auch) Ursachen hat, die außerhalb der Mathematik liegen. Beide Kapitel haben freilich nur beispielhafte Funktion. Sie sollen zum einen illustrieren, daß auch die Mathematik einer wissenssoziologischen Perspektive zugänglich ist, und sie sollen zum anderen die Leitthese dieser Arbeit konturieren, die These nämlich, daß der Computer auf eine sehr viel komplexere Weise mit der Idee und dem Prozeß der Rationalisierung verknüpft ist, als dies gemeinhin angenommen wird.

Kapitel 4

# Das Fließband im Kopf

## *Formale Rationalisierung und mathematischer Formalismus*

Welche große Kaserne, dieses moderne Leben! *Robert Walser*[1]

Man könnte fast sagen, daß die axiomatische Methode weiter nichts ist als das 'Taylorsystem' der Mathematik. *Nicolas Bourbaki*[2]

Die formalistische Mathematik, von der ausgehend Turing seine 'Papiermaschine' konzipiert hatte, wurde in einer Gesellschaft entwickelt, die sich in einem grundlegenden Umbruch befand. In der Zeit zwischen 1890 und 1933 machte Deutschland eine tiefgreifende soziale und kulturelle Umwandlung durch. Detlev Peukert spricht in diesem Zusammenhang von einem »soziokulturellen Durchbruch der Moderne« (Peukert 1987: 11). Um die Jahrhundertwende entfaltete sich die heutige moderne Gesellschaft auf breiter Front. Was sich in den verschiedenen gesellschaftlichen Sphären veränderte – im Bereich der Arbeit, in Kultur und Wissenschaft und in den privaten wie öffentlichen Beziehungsformen –, das wurde rezipiert und reflektiert, in der modernen Kunst, in Philosophie und Literatur, aber auch in der Soziologie und in der Mathematik.[3]

Hier wie dort werden 'Formalisierung', 'Berechenbarkeit' und 'Regelhaftigkeit' zu Leitbegriffen des theoretischen Denkens, und hier wie dort zeigt sich eine zunehmende Abstraktion von konkreten Erfahrungsinhalten: Anschauung wird zu einem Problem. Was David Hilbert als formalistische Direktive setzt: »Das inhaltliche Schließen wird durch ein äußeres Handeln nach Regeln ersetzt« (Hilbert 1925: 95), findet seinen Gegenpart in Max Webers Bestimmung bürokratischer Facharbeit als einer Tätigkeit, die sich »frei von Willkür und Unberechenbarkeiten, insbesondere 'ohne Ansehen der Person' streng formalistisch nach rationalen Re-

1 Walser 1907: 20
2 Bourbaki 1982: 295.
3 Es gibt meines Wissens jedoch noch keine Studie, die die sozialen Wandlungsprozesse dieser Zeit (die ich hier vor allem unter dem Aspekt der Rationalisierung diskutiere), systematisch in Beziehung setzt zum epochespezifischen kulturellen Diskurs, wie er auf je spezifische Weise in den verschiedenen kulturellen Subsystemen zum Ausdruck gebracht wurde.

geln« vollzieht (Weber 1922: 476). Und wenn Weber, um ein anderes Beispiel zu erwähnen, den modernen Richter mit einem »Automaten« vergleicht, »in welchen oben die Akten nebst den Kosten hineingeworfen werden, damit er unten das Urteil nebst den mechanisch aus Paragraphen abgelesenen Gründen ausspeie« (Weber 1921: 565), dann hat er damit plastisch ausgedrückt, was Alan Turing einige Jahre später präzise ausgearbeitet hat – die Beziehung nämlich zwischen regelgeleitetem Handeln und Mechanisierung. Und was für den Richter galt, das galt erst recht für die, wie Carl Friedrich von Siemens sie 1912 herablassend qualifizierte, »Scharen von minderwertigen Organen, die rein mechanisch arbeiten« (zit. in Kocka 1968: 552). Damit waren die Angestellten gemeint, deren Arbeit sich seit dem späten 19. Jahrhundert zunehmend darauf reduzierte, anhand vorgegebener Regeln standardisierte Probleme zu bearbeiten.

Das sind, zugebenermaßen, nur beliebig herausgegriffene Zitate. Dennoch markieren sie eine Übereinstimmung, die über eine zufällige terminologische Ähnlichkeit hinausreicht. Sie verweisen auf eine Parallele, die sich meines Erachtens zwischen der formalistischen Mathematik und den Deutungskategorien der damaligen Soziologie feststellen läßt. Was jedoch im soziologischen Diskurs explizit gemacht wird, fließt gewissermaßen unter der Hand in die formalistische Konzeption der Mathematik ein. Oder anders formuliert: Der moderne Formalismus, in dem die mathematischen Gegenstände – die Zeichen und Zeichenketten – bearbeitet werden nach strengen Regeln und ohne Ansehung ihrer Bedeutung, wirkt wie eine Duplikation jenes Prozesses, den die damalige Soziologie inhaltlich zum Thema macht.[4]

Die folgenden Ausführungen sind ein – zugegebenermaßen spekulativer – Versuch, die formalistische Auffassung der Mathematik, so wie sie von David Hilbert formuliert und von Alan Turing weiterentwickelt wurde, aus der Epoche heraus zu verstehen, in der sie entstanden ist.

---

4 Genaugenommen nicht nur inhaltlich. Die zunehmende Abstraktheit der soziologischen Begrifflichkeit, wie sie exemplarisch in Georg Simmels Programm einer 'formalen Soziologie' zum Ausdruck kam, hat vermutlich ebenfalls mit der zunehmenden Abstraktheit der sozialen Beziehungen zu tun. So sah es übrigens auch Simmel selbst, und auch Karl Mannheim scheint ähnliches im Sinn gehabt zu haben, als er den zunehmend formalen Charakter der soziologischen Begrifflichkeit wissenssoziologisch in Verbindung brachte mit der wachsenden Formalität der alltäglichen Umgangsformen in einer zunehmend differenzierten Gesellschaft. Die begriffliche »Formalisierung« habe ihren Grund in der »sozialen Lebensdistanzierung«. Im Zuge dieses Abstraktionsprozesses werde die »qualitative und gestalthafte Deskription der Phänomene« durch das »Paradigma des puren Mechanismus« abgelöst (Mannheim 1931: 259ff.).

Damit soll selbstverständlich nicht negiert werden, daß die Entwicklung des modernen Formalismus eine innermathematische Eigenlogik hat (vgl. dazu Kap. 1). Gleichzeitig scheint mir Hilberts mathematische Gedankenwelt (und das gilt ebenso für jene von Turing) aber auch von jenen Erfahrungen beeinflußt gewesen zu sein, die man damals in der Soziologie unter dem Begriff der (formalen) Rationalisierung diskutierte. Wenn die Bourbaki-Gruppe die axiomatische Methode Hilberts als »Taylorsystem der Mathematik« bezeichnet (Bourbaki 1982: 295), so ist das mehr als eine bloße Metapher, sondern verweist auf einen inneren Zusammenhang. Und ähnliches gilt für Henri Poincarés süffisanten Vergleich der modernen Mathematik mit den Fließbändern von Chicago: »Man könnte den Mathematiker durch die Denkmaschine ersetzen, die Stanley Jevons sich ausgedacht hat; oder, um deutlicher zu sein, man könnte sich eine Maschine ausdenken, in die man die Axiome an einem Ende einführen würde, während die Theoreme am andern Ende herauskommen, wie bei der sagenhaften Maschine in Chikago, bei der die Schweine lebend eingefüttert werden und als Schinken und Würstchen wieder zum Vorschein kommen.« (Zit. in Mehrtens 1990: 246)

Der Behauptung, daß auch die Mathematik geprägt ist vom zeitspezifischen Diskurs (und diesen ihrerseits mitformt), liegt die Annahme zugrunde, daß auch die Theorien der Mathematik beeinflußt sind von kulturellen Vorstellungen, die außerhalb des engen Bereichs der Wissenschaft entwickelt wurden, von 'Präideen', wie Ludwik Fleck sie nannte. Theorien und Theoreme, ob sie nun für wahr gehalten werden oder für falsch, sind Ergebnis wissenschaftlichen Handelns, und dieses Handeln ist ebenso wie alles andere Handeln deutungsabhängig. In die Deutungen und Orientierungen, die das wissenschaftliche Handeln leiten, geht aber nicht nur das fachspezifische Wissen ein. Auch alltagstheoretisches Wissen und zeitspezifische Deutungsmuster sind ein Teil davon, und diese müssen keineswegs diskursiv zugänglich sein, um wirksam zu sein. Der Mathematiker, der nach einer Beweisidee sucht, legt nicht sein außermathematisches Wissen ab, bevor er sich an die Arbeit macht (genausowenig wie die Wissenschaftssoziologin, die ihm das nachzuweisen sucht). Alltagstheoretisches und wissenschaftliches Wissen sind unteilbar, auch wenn die normativen Direktiven der Wissenschaftstheorie das im Prinzip nicht gestatten (vgl. Kap. 3).

Jede Epoche entwickelt eine Reihe von Leitbegriffen, mit denen sich die Gesellschaftsmitglieder die zeitspezifischen Erfahrungen begreiflich zu machen versuchen. Epochespezifische Deutungsmuster entstehen nicht von ungefähr, sondern weisen einen Zusammenhang auf zu der Gesellschaft, von der sie ein Teil sind, freilich nicht im plumpen Sinne einer bloßen Spiegelung, sondern als Ausdruck des Versuchs, sich die (neue) Wirklichkeit verständlich zu machen. Aus diesem Grunde sind sie in ihrem Inhalt und ihrer Form ebensosehr durch den Verlauf und die Struktur des Verständigungsprozesses geprägt wie durch die Wirklichkeit, auf die sie sich beziehen (vgl. Kap. 3 sowie S. 190ff.). Deutungsmuster, die für eine bestimmte Epoche leitend sind, bilden zwar ein bereichsübergreifendes semantisches Feld, sie werden jedoch von den verschiedenen kulturellen Subsystemen auf je spezifische Weise und in je spezifischen Medien zum Ausdruck gebracht.

Die Soziologen, die im ersten Drittel des Jahrhunderts die klassische Soziologie begründeten, allen voran Max Weber, Georg Simmel und Ferdinand Tönnies, lebten in einer Gesellschaft, die sich in einem grundlegenden Umbruch befand. Vieles schien neu zu sein und sich qualitativ zu unterscheiden von den vergangenen Gesellschaftsformen. Der Übergang von einer traditionalen zu einer modernen Gesellschaft, den die damaligen Soziologen zum Hauptthema ihrer Arbeit machten, wurde von ihnen mit einer von Reihe von zumeist polaren Kategorien zu strukturieren versucht, von denen viele auch die Ambivalenz ihrer persönlichen Einschätzung zum Ausdruck brachten.[5] Den Auftakt machte Ferdinand Tönnies 1887 mit seinem berühmten Begriffspaar *Gemeinschaft und Gesellschaft*. Was Tönnies selbst später nur noch als einen analytischen Begriff verstanden wissen wollte, wurde allerdings in der Folge als eine empirische Kategorie aufgefaßt und kulturkritisch gewertet. 'Gemeinschaft versus Gesellschaft' avancierte zum Generalthema der klassischen deutschen Soziologie und wurde zum Sammelbegriff für den vielschichtigen und problematischen Prozeß der sozialen und kulturellen Modernisierung, von dem die Soziologen dieser Zeit Zeuge waren und den sie mit einer Reihe von Begriffen zu verstehen suchten, die heute zum konzeptuellen Fundus der Fachsoziologie gehören (vgl. Käsler 1984: 311f.).

'Rationalisierung' und 'Differenzierung' waren die beiden Hauptbegriffe, mit denen man in der damaligen Soziologie den Wandel zur modernen Gesellschaft zu beschreiben suchte: die Entpersonalisierung sozialer Beziehungen, die zunehmende Dominanz von kühlen Zweck-Mittel-

---

5 Zum Entstehungszusammenhang und der thematischen Orientierung der klassischen Soziologie in Deutschland vgl. vor allem Käsler 1984. Einen vergleichenden Überblick geben auch Dahme/Rammstedt 1984; Pohlmann 1987 und diverse Aufsätze in Rammstedt 1988.

Berechnungen, die Tendenz zu Abstraktion und Quantifizierung, die Teilung der Arbeit bis hin zur Zergliederung einzelner Arbeitsverläufe, die zunehmende Regelhaftigkeit der sozialen Verhältnisse und der Wunsch nach Berechenbarkeit und Kontrolle. Beherrschbarkeit der Welt durch Zergliederung und Berechnung, das war für die damaligen Soziologen das Grundmerkmal des modernen Rationalismus, wie sie ihn in der modernen Gesellschaft verkörpert sahen. 'Rationalisierung' war der Blickwinkel, von dem her sie sich die Gesellschaft, in der sie lebten, verständlich zu machen suchten. »Unser europäisch-amerikanisches Gesellschafts- und Wirtschaftsleben ist in einer spezifischen Art und in einem spezifischen Sinn 'rationalisiert'«, schrieb Max Weber 1918. »Diese Rationalisierung zu erklären und die ihr entsprechenden Begriffe zu bilden, ist daher eine der Hauptaufgaben unserer Disziplinen.« (Weber 1918: 525)

Aus der Sicht von Ferdinand Tönnies, Georg Simmel und Max Weber markierte der Rationalisierungsprozeß einen globalen Trend, der sich jedoch in den verschiedenen gesellschaftlichen Sphären und Subsystemen auf unterschiedliche Weise artikulierte. D.h. im Gegensatz zur marxistischen Tradition, die den Prozeß der Rationalisierung primär in der Ökonomie verortete, war er für die Soziologen dieser Zeit ein übergreifendes soziales Funktionsprinzip, das in den verschiedensten gesellschaftlichen Teilbereichen auf je spezifische Weise zum Ausdruck kam, im kapitalistischen Betrieb, im modernen Recht, in der Wissenschaft und nicht zuletzt auch in der privaten Lebensführung.[6] Was aber war mit dem Begriff 'Rationalismus' genau gemeint? Trotz aller Differenzen, was empirische Fundierung und analytische Schärfe anbelangt, hatten Georg Simmel und Max Weber ein ähnliches empirisches Phänomen im Sinn, wenn sie vom modernen Rationalismus sprachen: den spezifisch modernen 'Modus der Beherrschung durch Berechnung'. »Rationalisierung meint bei Simmel und Weber zunächst und primär«, schreibt Friedrich Pohlmann, von dem diese Wendung stammt, »einen Prozeß der Differenzierung der Gesellschaft in objektivierte Teilsysteme, die durch immer exaktere Berechnung strukturiert werden.« (Pohlmann 1987: 1)

Es sei das Erkenntnisideal der Neuzeit, schrieb etwa Georg Simmel in seiner *Philosophie des Geldes*, die »Welt als ein großes Rechenexempel zu begreifen« und die »Vorgänge und qualitativen Bestimmtheiten der

6 Dazu gehören nicht nur die Professionalisierungsbestrebungen im Haushalt, sondern auch Max Webers »Geschlechtsverkehr gesundheitshalber« (Weber 1965: 251). Die Frauen selbst haben zu dieser privaten Rationalisierung nicht unbeträchtlich beigetragen; vgl. Heintz/Honegger 1981, insb. S. 31ff.

Dinge in einem System von Zahlen einzufangen«. »Kahle Verstandesmäßigkeit« war für ihn das Signum der Epoche (Simmel 1900: 612; 600). Und für Max Weber hieß Rationalismus »1. der generell eingelebte Glaube daran, daß die Bedingungen seines Alltagslebens, heißen sie nun: Trambahn oder Lift oder Geld oder Gericht oder Militär oder Medizin, prinzipiell rationalen Wesens, d.h. der rationalen Kenntnis, Schaffung und Kontrolle zugängliche menschliche Artefakte seien (...) 2. die Zuversicht darauf, daß sie rational, d.h. nach bekannten Regeln (...) funktionieren, daß man, im Prinzip wenigstens, mit ihnen 'rechnen', ihr Verhalten 'kalkulieren', sein eigenes Handeln an eindeutigen, durch sie geschaffenen Erwartungen orientieren könne. Und hier liegt das spezifische Interesse des rationalen kapitalistischen 'Betriebes' an 'rationalen' Ordnungen, deren praktisches Funktionieren er in seinen Chancen ebenso berechnen kann wie das einer Maschine.« (Weber 1913: 473f.)

Max Weber hat die für die moderne Gesellschaft spezifische Rationalitätsform als *formale* Rationalität bezeichnet.[7] Formale Rationalität meint mehr als bloße Zweckrationalität. Von praktischer Rationalität unterscheidet sie sich durch Rechenhaftigkeit und Bezugnahme auf explizite und allgemeine Regeln. »Während praktische Rationalität immer eine diffuse Neigung zur Kalkulation und zur Lösung alltäglicher Probleme durch pragmatisches, an den eignen Interessen orientiertes Handeln impliziert, legitimiert die formale Rationalität eine ähnliche zweckrationale Kalkulation letztlich durch Bezugnahme auf eine universal angewendete Regel, Vorschrift, oder ein Gesetz. In dem Maß, in dem reine Rechenhaftigkeit, die allgemeinen Regeln folgt, herrscht, werden Entscheidungen 'ohne Ansehen der Person' getroffen.« (Kalberg 1981: 18) Die moderne Bürokratie, für Weber ein Schlüsselphänomen der rationalisierten modernen Gesellschaft, steht, anders formuliert, nicht einfach für Zweckrationalität, sondern für ein Handeln, das durch explizite Regeln bestimmt ist und dem einzelnen im Prinzip keinen individuellen Verhaltensspielraum mehr offen läßt – für formale Rationalität mit anderen Worten.

Formale Rationalität ist in den Augen von Max Weber das grundlegende Strukturprinzip der modernen abendländischen Gesellschaft. Berechenbarkeit und Orientierung an allgemeinen Regeln kennzeichnen das moderne Recht, die (staatliche) Bürokratie und den kapitalistischen

7 Zum Begriff der formalen Rationalität und dessen Abgrenzung von den anderen Weberschen Rationalitätstypen vgl. u.a. Döbert 1989; Habermas 1981, insb. Bd. 1, S. 239ff., 377ff.; Kalberg 1981; Pohlmann 1987: 97ff.; Schluchter 1979: insb. S. 190ff.

Betrieb, um nur die drei Hauptbereiche formaler Rationalisierung zu erwähnen. »Der moderne kapitalistische Betrieb ruht innerlich v.a. auf der Kalkulation. Es braucht für seine Existenz eine Justiz und Verwaltung, deren Funktionieren wenigstens im Prinzip ebenso auf festen generellen Normen rational kalkuliert werden kann, wie man die voraussichtliche Leistung einer Maschine kalkuliert.« (Zit. in Pohlmann 1987: 107) Um solches »maschinenmäßiges Funktionieren« (Weber) zu garantieren, muß zweckrationales Handeln von den individuellen Orientierungen abgelöst und auf einer höheren Ebene institutionalisiert werden. Rainer Döbert spricht in diesen Zusammenhang von einer Rationalisierung zweiter Stufe: »Es ist eine Sache, einzelne Handlungen zweck- oder normrational zu gestalten; es ist eine ganz andere Sache, ein ganzes Feld kontinuierlichen Handelns so zu organisieren, daß mit Sicherheit jede Handlung zu jedem Zeitpunkt Rationalitätsstandards genügt. 'Maschinenmäßiges Funktionieren' soll erreicht werden, und damit wendet man ein Rationalitätskriterium höherer Stufe an. 'Wie muß zweck- oder normrationales Handeln gestaltet werden, damit es kontinuierlich, sicher, berechenbar erwartet werden kann', lautet nun die Frage. Die formale Rationalität der Bürokratie ist die Antwort auf diese Frage.« (Döbert 1989: 242) Während individuelle Zweck-Mittel-Rationalität im Prinzip eine maximale Handlungsfreiheit garantiert, kehrt sich mit der Institutionalisierung formaler Rationalität das Verhältnis um: Mittel wie Zwecke werden von außen gesetzt. Klassisches Beispiel dafür ist die bürokratische Verwaltung und die fordistische Fabrik.

Formale Rationalisierung macht Verhalten berechenbar und voraussagbar. Und das ist auch ihr Zweck. Was der Arbeiter (der Beamte, der Soldat, die einfache Angestellte) persönlich denkt, spielt keine Rolle. Sie führen bloß Anweisungen aus, wie eine Maschine. Max Weber hat diese Form der Verhaltensregulierung als 'rationale Disziplin' bezeichnet. Rationale Disziplin ist »die konsequent rationalisierte, d.h. planvoll eingeschulte, präzise, alle eigene Kritik bedingungslos zurückstellende, Ausführung des empfangenen Befehls«, und das entscheidende Merkmal ist ihr Massencharakter, d.h. »ihre spezifischen Wirkungen beruhen auf ihrer Qualität als Gemeinschaftshandeln eines Massengebildes« (Weber 1921: 681).

Die 'Revuegirls', die in den 20er Jahren in den Augen ihres europäischen Publikums die Leitprinzipien des amerikanischen *way of life* im wahrsten Sinne des Wortes 'verkörperten', brachten die Idee rationaler Disziplinierung technisch zur Perfektion und hoben sie aus der grauen

Welt von Fabrik und Kaserne heraus (vgl. Schütz 1986: 163ff.). Die »Girlsmaschine« atme Leben und erinnere nicht an Fabriksäle, schrieb 1925 ein Bewunderer, dem diese aber offenbar doch in den Sinn kamen, als er sich an den Tiller-Girls delektierte. Besonders fasziniert (oder je nachdem auch angewidert) zeigten sich die zeitgenössischen Kommentatoren von der Aufhebung des Individuellen im tanzenden Kollektiv – in der »Bewegungsmaschine«. Der weibliche Kollektivkörper erinnerte an den Drill und die Unterwerfungsrituale im Militär und versah diese mit der Faszination des Erotischen. »Dieses Einexerzierte, Parallele, Taktmäßige (...), dieses Gehorchen einem unsichtbaren, aber unentrinnbaren Kommando, das schöne 'Abgerichtet' sein, das Untertauchen des Individuums in der Vielzahl, das Zusammenfassen der Körper zu einem 'Körper'«, all dies, so Alfred Polgar in einem bissigen Essay zu diesem tanzenden 'Plurale tantum', erinnere an das Soldatenspiel, von dem für den Zuschauer ein ähnlicher Reiz ausgehe (zit. in Schütz 1986: 164).

Rationale Disziplinierung ist eine Form der Verhaltensreglementierung, die über eine rigorose Einschränkung des persönlichen Handlungsspielraums läuft und deren Wirksamkeit primär auf Zwang beruht.[8] Ihr »Mutterschoß«, so Weber mit einer etwas schiefen Metapher, ist das Heer, im kapitalistischen Betrieb gelangt sie zur Perfektion. »Die Betriebsdisziplin ruht (...) hier völlig auf rationaler Basis, sie kalkuliert zunehmend, mit Hilfe geeigneter Messungsmethoden, den einzelnen Arbeiter ebenso, nach seinem Rentabilitätsoptimum, wie irgendein sachliches Produktionsmittel.« (Weber 1921: 686) Taylors 'Wissenschaftliche Betriebsführung' markiert dann den vorläufigen Schlußpunkt dieser Entwicklung.

Im Konzept der (formalen) Rationalisierung verdichtete sich für die Klassiker der Soziologie ein spezifisches Grundmuster moderner Erfahrung. 'Rationalisierung' war der Schlüsselbegriff, mit dem sie sich einen realhistorischen Prozeß begreiflich machen wollten, der zwar schon früher eingesetzt, aber im späten 19. Jahrhundert eine enorme Ausweitung erfahren hatte. Wie sozialhistorische Untersuchungen zur Arbeitswelt[9] belegen, war der Rationalisierungsprozeß, den die damaligen Soziologen

---

8 Wie dieser Zwang konkret funktioniert, das hat Max Weber plastisch in seinem Stammler-Aufsatz beschrieben (Weber 1907: 325ff.). Ich komme in Kapitel 7 darauf zurück.

9 Was Rationalisierung konkret hieß, ließe sich auch anderen gesellschaftlichen Bereichen veranschaulichen. Die Veränderungen im Bereich der Arbeitsorganisation gehörten aber sicher zu den folgenreichsten Entwicklungen und wurden auch am häufigsten diskutiert, nicht nur von den zeitgenössischen Soziologen.

thematisierten, ein mehrschichtiges Phänomen, in dem verschiedene Entwicklungslinien zusammenliefen:

(1) Die *Formalisierung* von Handlungsvollzügen, d.h. die zunehmende Ausrichtung des Handelns an allgemeinen Verfahrensregeln, die seit dem späten 19. Jahrhundert allmählich an die Stelle persönlicher Anweisungen und Kontrollen traten (vgl. Kocka 1969; König u.a. 1985). Noch in den späten 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde in der betriebsorganisatorischen Literatur die mündliche Instruktion als die beste bezeichnet. Es dominierte ein personenbezogener, partikularistischer Leitungsstil, formale Regeln gab es praktisch keine. Der Patron sagte, was zu tun ist, von Fall zu Fall, und überwachte persönlich die Ausführung seiner Anweisungen. Seit den späten 80er Jahren wurden unter dem Stichwort 'Organisation', definiert als »Zusammenfassung und Eingliederung von Mitteln zur Erreichung eines Zweckes« (zit. in Kocka 1969: 352), die Betriebsvorgänge zunehmend reglementiert und arbeitsteilig organisiert. An die Stelle von persönlichen Beziehungen traten schriftlich formulierte Anweisungen. »Der alte patriarchalische Verkehr zwischen Prinzipal und Angestellten hat einem kühleren Verhältnis weichen müssen«, konstatiert 1905 ein Schweizer Angestellter nicht ohne Bedauern (zit. in König u.a. 1985: 58). Der persönliche Kontakt wurde auf ein Minimum reduziert und wo möglich standardisiert, so daß im Extremfall die »wilden« Besprechungen abgelöst wurden durch Berichte nach vorgegebenen Regeln (Kocka 1969: 352; 362). Die Arbeit selbst wurde strikt arbeitsteilig organisiert und über fixe – und oft schriftlich formulierte – Anweisungen reglementiert. Damit entstand ein weiter Bereich von Massenarbeiten, die sich rein routinemäßig ausführen ließen und die mit der Zeit, wie man damals kritisch vermerkte, zu einer »Schematisierung des Geistes und des ganzen Menschen« führten (zit. in König u.a. 1985: 71). Pflichtenhefte, Dienstreglemente und Betriebsordnungen wurden formuliert, und in den Großbetrieben führte man Formulare ein und Arbeitskarten, nicht zuletzt auch in Zusammenhang mit der Einführung des 'Taylor-Systems'. Damit schafften sich die Betriebe eine Struktur, eine »rationale Ordnung«, wie Max Weber schreibt, die berechenbar war und kalkulierbar.

(2) Ausdifferenzierung einer *übergeordneten Instanz*, die die Regeln formuliert und ihre Befolgung überwacht. Im Falle der Bürokratie ist die

Satzung der Regeln wiederum regelbestimmt, im Falle privat-wirtschaftlicher Betriebe handelt die übergeordnete Instanz partiell autonom.[10]

(3) Zunehmende Arbeitsteilung bis hin zur *Zergliederung* einzelner Arbeitsabläufe. Die Formalisierung von Arbeitsabläufen setzt die Aufspaltung von komplexen Handlungsabläufen in elementare Operationen voraus, die dann anschließend nach Effizienzkriterien resynthetisiert werden. Damit werden Handlungen reproduzierbar und die Handelnden im Prinzip substituierbar, entweder durch Menschen oder durch Maschinen. Klassisches Beispiel dafür ist der Taylorismus. Die fordistische Fabrikorganisation bringt dieses Prinzip zur Vollendung: mit Hilfe des Fließbandes werden die einzelnen Arbeitsgänge zu einem Gesamtmechanismus koordiniert.[11]

(4) Zunehmende *Quantifizierung und Abstraktion.* In Zusammenhang mit dem Bedürfnis nach exakter Kalkulation und betrieblicher Transparenz werden Produktionsmittel, Arbeitsprozesse und Arbeitskräfte in zunehmendem Maße als abstrakte und quantifizierbare Größen behandelt. Dieser Prozeß geht einher mit einer Standardisierung der betrieblichen Informationserhebung. Was als relevante Information anzusehen und systematisch zu erheben ist, wird explizit festgeschrieben. Technische Hilfsmittel dafür sind Arbeitskarten und Formulare, die in Großbetrieben seit dem späten 19. Jahrhundert verwendet werden.[12] Bereits 1878 wird in einem betriebsorganisatorischen Handbuch vorgeschlagen, Aufträge, Magazin-Bestellungen, Konstruktionsangaben etc. numerisch zu codieren und sie auf Formularen einzutragen, zwecks besserer Kontrolle und größerer Übersichtlichkeit des Informationsflusses (Kocka 1969: 340). Formulare und Arbeitskarten dienen aber nicht nur der betrieblichen Transparenz, sie sind gleichzeitig ein effizientes Instrument zur Informationsselektion. Was nicht unter das Klassifikationsschema fällt, braucht nicht registriert zu werden. Damit verbunden ist die Tendenz, von der konkreten Beschaffenheit der Bearbeitungsobjekte zu abstrahieren, seien das nun materielle Gegenstände oder Menschen. Im Extremfall werden sie numerisch codiert und lassen sich damit tendenziell auf einer rein syntaktischen Ebene wahrnehmen und beschreiben.

10 Zum Widerstand der Unternehmungsleitung, Formalisierung reflexiv auf sich selbst anzuwenden vgl. Kocka 1969: 354ff.

11 Streng genommen erfüllt erst die fordistische Fabrikorganisation die Kriterien formaler Rationalisierung.

12 In den 20er Jahren wurde diese Form der Datenerhebung weiter perfektioniert und bereitete damit den Boden vor für den Einsatz der ersten Computer in den späten 50er und 60er Jahren; vgl. dazu ausführlicher Heintz 1990a.

(5) *Nivellierung und Entindividualisierung*. Formale Rationalisierung geht einher mit einer sukzessiven Ausschaltung der subjektiven und persönlichen Anteile am Handlungsprozeß, bis der Arbeitende schließlich in seinem Verhalten immer mehr jener Maschine gleicht, die ihn dann später ersetzen wird (vgl. auch Kap. 7). Das galt nicht nur für die Fabrikarbeit, sondern betraf in zunehmendem Maße auch die Büroarbeit, die, wie man damals häufig monierte, selbständiges Denken und persönliche Initiative kaum mehr erfordere. Mit seinem Prinzip der Trennung von Hand- und Kopfarbeit hat Frederick W. Taylor die Ausschaltung des Denkens zum Programm gemacht, zumindest für den Bereich der manuellen Arbeit. Die in dieser Zeit einsetzende kulturkritische Debatte um die Bedrohung bürgerlicher Individuierung durch den neuen Typus des amerikanisierten 'Massenmenschen' ist auch vor diesem Hintergrund zu sehen.

Zur selben Zeit, als man in der Soziologie den Modernisierungsprozeß systematisch unter dem Blickwinkel der (formalen) Rationalisierung zu deuten begann, setzte sich in der Mathematik die Auffassung durch, daß man das Betreiben von Mathematik reduzieren könne auf einen rein formalen Prozeß, der im wesentlichen darin bestehe, Zeichenreihen Schritt für Schritt umzuformen, nach klaren Regeln und ohne Ansehung ihrer Bedeutung. Vereinfacht formuliert zeichnet sich der Hilbertsche Formalismus durch folgende Merkmale aus (vgl. Kap. 1).

(1) Die Axiome haben keinen anschaulichen oder evidenten Charakter mehr, sondern sind im Prinzip beliebig wählbare Hypothesen, 'Satzungen' gewissermaßen.

(2) Die mathematischen Gegenstände und ihre Beziehungen untereinander sind rein immanent definiert, über die Axiome, und haben keinen Bezug mehr zu einer Welt außerhalb der Mathematik.

(3) Die Axiome und die durch sie definierten Gegenstände werden im Medium einer formalen Sprache als Zeichen und Zeichenketten dargestellt, und es ist diese Zeichenebene, auf der die formalistische Mathematik operiert. Anschauung ist reduziert auf die Wahrnehmung von Markierungen auf dem Papier.

(4) Die Bausteine dieser Sprache bestehen aus einem Grundbestand von Zeichen und einer beschränkten Anzahl von Regeln, die genau festlegen, auf welche Weise die Zeichen kombiniert und die Zeichenketten transformiert werden dürfen.

(5) Das Operieren mit diesen Zeichen, ihre Kombination und Transformation, ist im Prinzip ein rein mechanischer Prozeß. Das inhaltliche

Schließen wird, wie Hilbert schreibt, »durch ein äußeres Handeln nach Regeln ersetzt« (Hilbert 1925: 95).

Im Hilbertschen Formalismus wird die Mathematik umgebaut zu einem Regelwerk, zu einer Maschinerie, in der der Mathematiker – sind die Axiome einmal gesetzt – im Prinzip nur noch Vollzugsfunktionen hat. Er wird, um Max Weber zu paraphrasieren, zu »einem Glied in einem (...) Mechanismus, der ihm eine im wesentlichen gebundene Marschroute vorschreibt« (Weber 1921: 570). Weber bezieht sich in diesem Zitat auf die moderne bürokratische Verwaltung, auf jene gesellschaftliche Sphäre also, die in seinen Augen das Prinzip der formalen Rationalität am offenkundigsten verkörperte. Abstrahiert man von der inhaltlichen Gestalt, die der Rationalisierungsprozeß annahm, und definiert ihn statt dessen in Termini seiner Grundprinzipien – Ausrichtung des Handelns an allgemeinen Regeln, Entindividualisierung, Aufspaltung komplexer Abläufe in elementare Operationen etc. –, so wird sichtbar, in welchem Ausmaß eine formale Übereinstimmung besteht zwischen dem sozialen Prozeß der Rationalisierung und der formalistischen Auffassung der Mathematik (vgl. Diagramm 1):

*Diagramm 1*

| Formale Rationalisierung | Moderner Formalismus | Turingmaschine |
|---|---|---|
| Formalisierung von Arbeitsabläufen | Aufbau der Mathematik in Form eines Kalküls | Darstellung des Algorithmus in Termini von Maschinenoperationen |
| Zergliederung von Arbeitsabläufen | Ableitungen sind Sequenzen elementarer Einzelschritte | Zerlegung komplexer Prozesse in elementare Grundoperationen (Einlesen, Schreiben, Löschen) |
| Abstraktion: Quantifizierung und Standardisierung von Information | Objekte sind bedeutungsfreie Markierungen auf dem Papier | Objekte sind bedeutungsfreie Markierungen auf dem Band |
| Entindividualisierung | Mechanisches Anwenden von Regeln | Symboloperation wird von einer Maschine ausgeführt |
| Satzung von Regeln | Axiomensystem als willkürliche Satzung des 'freien' Mathematikers | – |

Eine solche Zusammenstellung beweist natürlich nichts. Die Parallelen könnten bloßer Zufall sein (oder reine Konstruktion), und auch andernfalls sagten sie nichts über die Richtung der Abhängigkeitsbeziehungen aus.[13] Aber dennoch spricht einiges für die Vermutung, daß die mit dem Rationalisierungsprozeß verbundene Grundidee – die Idee der Zerlegbarkeit, der Regelhaftigkeit und die Tendenz zur Abstraktion – ein verbindendes und gemeinsames kulturelles Konzept war, das das Denken in dieser Zeit prägte und von den verschiedenen kulturellen Systemen auf je spezifische Weise und in einer je eigenen Sprache zum Ausdruck gebracht wurde, von der Soziologie, der Kunst und der Musik, aber auch von der Mathematik. Diesem Zusammenhang möchte ich zum Abschluß noch etwas Kontur verleihen, und zwar am Beispiel der Beziehung, die sich meiner Ansicht nach zwischen dem mathematischen Denken Alan Turings und der Rationalisierungsbewegung seiner Zeit ausmachen läßt.

Alan Turing war zu seiner Zeit nicht der einzige Mathematiker, der sich um eine formale Definition des Algorithmusbegriffs bemühte. Im selben Jahr, 1936, als Turing seine Arbeit publizierte, stellte Alonzo Church seine berühmte These auf, und ein dritter Mathematiker, Emil Post, schlug eine weitere Präzisierung vor, und zwar mit Hilfe einer Argumentation, die praktisch deckungsgleich war mit jener von Turing (vgl. S. 77). Turing und Post wußten nichts voneinander, und dennoch kamen beide auf genau dieselbe Idee. Mit einem bezeichnenden Unterschied allerdings. Beide verbanden die Idee des Algorithmus mit etwas 'Mechanischem', nur führte Turing zur Präzisierung eine *Maschine* ein, Emil Post dagegen einen *Fließbandarbeiter*. Beide Konzeptionen erwiesen sich jedoch als äquivalent. Emil Post entwarf bis ins kleinste Detail genau dasselbe Modell wie Alan Turing, nur war der Ausführende bei ihm nicht eine Maschine, sondern ein 'Arbeiter', der völlig mechanisch seinen In-

---

13 Der Versuch, die Kontextabhängigkeit der Mathematik über eine Identifikation von Strukturähnlichkeiten zwischen der Innenwelt der Mathematik und ihrer kulturellen Außenwelt festzumachen, folgt in gewissem Sinne der Erklärungslogik des 'Kongruenzmodells' (vgl. kritisch Knorr-Cetina 1983: 115ff.; Yearley 1982: 376ff.; Slezak 1989: 565). Karin Knorr-Cetina wirft dem 'Kongruenz-Modell' vor, daß es bei einer Homologie-Behauptung stehenbleibe und die Frage nach der *genetischen* Beziehung zwischen sozialen Interessen – oder in meinem Fall: außerwissenschaftlichen Deutungsmustern – und wissenschaftlichen Wissensinhalten ausklammere. Das ist richtig. Nur verfügt man bei historischen Beispielen im allgemeinen bloß über Informationen zum fertigen Produkt, während Daten über den wissenschaftlichen Produktionsprozeß, und dieser wäre ja an sich der Ort einer Interferenz von sozialen/kulturellen und kognitiven Faktoren, praktisch nie zur Verfügung stehen. Deshalb ist es wohl auch kein Zufall, daß Wissenschaftshistorikerinnen und -historiker vor allem mit dem Interessenmodell arbeiten. Daß sie dabei häufig von einem objektivistischen Interessenbegriff ausgehen, scheint mir dabei um einiges problematischer zu sein als das Kongruenzmodell selbst.

struktionen folgt. Der Postsche Arbeiter bewegt sich in einem »symbol space«, und dieser Symbolraum besteht wie bei Turing aus einer unendlichen Folge von Feldern, die entweder leer sind oder eine Markierung enthalten: »The symbol space is to consist of a two way infinite sequence of spaces or boxes (...) The problem solver or worker is to move and work in this symbol space, being capable of being in, and operating in but one box at time. And apart from the presence of the worker, a box is to admit of but two possible conditions, i.e., being empty or unmarked, and having a single mark in it, say a vertical stroke.« (Post 1936: 289) Der Postsche 'Arbeiter' führt nun in (bzw. auf) diesem unendlichen Band folgende Operationen aus:

»(a) Marking the box he is in (assumed empty),
(b) Erasing the mark in the box he is in (assumed marked),
(c) Moving to the box on his right,
(d) Moving to the box on his left,
(e) Determining whether the box he is in, is or is not marked.«
(Post 1936: 289)

Was er bei jedem Schritt tut, ist bestimmt durch ein »set of directions«, durch eine Menge von Anweisungen, »which will both direct operations in the symbol space and determine the order in which those directions are applied« (Post 1936: 289). Der Postsche Arbeiter tut also genau dasselbe wie Turings Maschinenkopf. Er bewegt sich nach rechts oder nach links, überschreibt ein Symbol oder löscht es. Und dies alles tut er, wie eine Maschine, völlig mechanisch. Er führt blind, ohne zu denken, Instruktionen aus. Beide Präzisierungen des Algorithmusbegriffs sind mathematisch gesehen äquivalent. Der Postsche 'Arbeiter' läßt sich durch eine Turingmaschine ersetzen und die Turingmaschine durch den Postschen Arbeiter.[14]

Obschon Turing und Post nichts voneinander wußten, kamen also beide auf genau dieselbe Idee, und sie illustrierten diese Idee anhand eines praktisch identischen Designs: Ein unendliches Band. Unterteilung in Felder. Einfachste Handlungen. Mechanisches Ausführen von Befehlen. Schrittweises Vorgehen. Sequentielle Anordnung. Der Grundgedanke blieb sich bei beiden gleich: Das Befolgen eines Algorithmus ist ein Prozeß, dessen Ausführung keine Abweichung, keinen Spielraum zuläßt.

14 Was noch einmal deutlich macht, daß die 'Maschinenhaftigkeit' der Turingmaschine für die theoretische Argumentation nicht von Belang ist. Dasselbe hätte sich auch anhand eines (universellen) Postschen 'Arbeiters' ausdrücken lassen, vgl. dazu auch Kap. 7.

Turing illustrierte diese Idee am Beispiel einer Maschine, Emil Post am Beispiel eines Fließbandarbeiters. Beide funktionieren im Prinzip genau gleich. Sie sind austauschbar. Was ein Mensch rein mechanisch tut, das kann auch von einer Maschine ausgeführt werden, schrieb Turing und zeigte damit, daß ein Mensch, der Schritt für Schritt klaren Anweisungen folgt, sich von einer Maschine kaum unterscheidet. Dies konnte man zu dieser Zeit auch außerhalb der Mathematik lernen, und ich denke, genau das haben Turing (und Post) getan.

In den 20er Jahren entstand in praktisch allen europäischen Ländern eine Bewegung, die sich an Amerika orientierte und die dort entwickelten Produktionsmethoden als Lösung der wirtschaftlichen und sozialen Probleme propagierte.[15] Das war die Zeit, als der sog. 'Wissenschaftliche Sozialismus' seine größte Anhängerschaft hatte. 'Ford oder Marx' hieß ein Buch, das 1925 erschien und die Alternative auf den Begriff brachte: Entweder Revolution oder Harmonisierung von Arbeit und Kapital durch Steigerung der Produktivität. 'Wohlstand für alle' hieß die Devise, Rationalisierung und Technisierung waren die Mittel dazu.[16] 'Rationalisierung' wurde zu einem Schlüsselbegriff im Rahmen der wirtschaftspolitischen Diskussion und bezeichnete ein breites Spektrum von Maßnahmen, die von technischen Innovationen über sozialorganisatorische Eingriffe bis hin zu kartellähnlichen Zusammenschlüssen reichten. Unter Rationalisierung verstehe man, so die offizielle Definition der Weltwirtschaftskonferenz von 1927, »die Anwendung technischer und organisatorischer Methoden, die auf ein Mindestmaß an Kraft- und Stoffverlust hinauslaufen. Rationalisierung bedeutet wissenschaftliche Organisation der Arbeit, Normung sowohl der Stoffe wie auch der Erzeugnisse, Vereinfachung der Verfahren und Verbesserungen der Transport- und Absatzmethoden.« (Zit. in Urwick 1930: 7)

15 Zur 'Rationalisierungsbewegung' (wie man sie bereits damals nannte) gibt es eine Vielzahl von zeitgenössischen Dokumenten. Ich beziehe mich im folgenden vor allem auf Devinat 1927 sowie Urwick 1930.

16 Vor allem in der ersten Hälfte der 20er Jahre war 'Rationalisierung' noch mit einer stark gesellschaftspolitischen Komponente konnotiert. Der Begriff umschloß, wie Maier 1970 ausführt, die Vision einer von technischer Effizienz geprägten, reibungslosen funktionierenden Welt. Die 'amerikanischen Methoden' versprachen, ganz im Sinne ihrer Begründer Frederick W. Taylor und Henry Ford, eine technokratische Lösung der Klassenfrage, und genau das machte sie für breite Kreise attraktiv – u.a. auch für Konrad Zuse, einem begeisterten Anhänger von Henry Ford, der sich bei der Entwicklung seiner Computer von den Rationalisierungspraktiken seiner Zeit leiten ließ, vgl. ausführlicher Kap. 6.

Im Bereich der sozialorganisatorischen Rationalisierung orientierte man sich vorwiegend an Frederick W. Taylors (1856 – 1915) *Scientific Management*, dessen Methode, wie Albert Thomas, der damalige Direktor des Internationalen Arbeitsamts schrieb, den »besten Ertrag beim Faktor Mensch« zu versprechen schien (Devinat 1927: iii). Im Taylorismus wird nicht die Maschine, und auch nicht der Betrieb insgesamt, sondern der Mensch und die menschliche Arbeitsleistung einer exakten Kalkulation unterzogen, zum Zwecke einer maximalen Steigerung der Produktivität. Die tayloristische Methode, die sog. 'Wissenschaftliche Betriebsführung', vereint, was die damaligen Soziologen als Strukturprinzipien der modernen Gesellschaft ausgemacht hatten: Rationalisierung und Differenzierung. Im Taylorismus werden Tätigkeiten in ihre Bestandteile zerlegt, ausgemessen und nach Effizienzkriterien neu zusammengesetzt. Der einzelne Arbeiter wird, wie Max Weber schreibt, nach »seinem Rentabilitätsoptimum (kalkuliert) wie irgendein sachliches Produktionsmittel« (Weber 1921: 686). Er ist eine Masse, eine Körpermasse, die formbar ist und deren Leistungen sich ausmessen und anschließend optimieren lassen. Die »höchsten Triumphe« feiere die 'rationale Disziplinierung' im »amerikanischen System des 'scientific management', welches darin die letzten Konsequenzen der Mechanisierung und Disziplinierung des Betriebs zieht«, so Weber über Taylors *Wissenschaftliche Betriebsführung*. »Hier wird der psychophysische Apparat des Menschen völlig den Anforderungen, welche die Außenwelt, das Werkzeug, die Maschine, kurz die Funktion an ihn stellt, angepaßt, seines, durch den eigenen organischen Zusammenhang gegebenen, Rhythmus entkleidet und unter planvoller Zerlegung in Funktionen einzelner Muskeln und Schaffung einer optimalen Kräfteökonomie den Bedingungen der Arbeit entsprechend neu rhythmisiert. Dieser gesamte Rationalisierungsprozeß geht hier wie überall, vor allem auch im staatlichen bürokratischen Apparat, mit der Zentralisation der sachlichen Betriebsmittel in der Verfügungsgewalt des Herrn parallel.« (Weber 1921: 686f.)

Während die tayloristischen Prinzipien in Amerika schon längere Zeit verankert waren, wenn auch längst nicht in jenem Maße, wie ihre Verfechter behaupteten, stießen sie in Europa erst nach dem 1. Weltkrieg auf öffentliches Interesse, nicht zuletzt auch unter dem Eindruck der Krise der frühen 20er Jahre.[17] 'Wissenschaftlich' an Taylors System schien vor

17 Praktisch erprobt wurden sie allerdings schon vor dem 1. Weltkrieg, doch wurden sie damals in der Öffentlichkeit noch kaum wahrgenommen. Dies geschah erst in den 20er Jahren; vgl. für Deutschland Kocka 1969: S. 359ff.; Burchardt 1977; Homburg

allem die Systematik zu sein, mit der er die Arbeitsabläufe analysierte. Anstatt wie bisher 'Normalzeiten' einigermaßen willkürlich festzulegen, aufgrund ungenauer und bloß zufällig erhobener Information, sollten nun exakt ermittelte Daten eine unanfechtbare Grundlage liefern. Man suche erstens, schrieb Taylor in seinen *Principles of Scientific Management*, »10 – 15 Leute (...), die in der speziellen Arbeit, die analysiert werden soll, besonders gewandt sind. Zweitens: Man studiere die genaue Reihenfolge der grundlegenden Operationen, welche jeder einzelne dieser Leute immer wieder ausführt, wenn er die fragliche Arbeit verrichtet (...) Drittens: man messe mit der Stoppuhr die Zeit, welche zu jeder dieser Einzeloperationen nötig ist, und suche dann die schnellste Art und Weise herauszufinden, auf die sie sich ausführen läßt. Viertens: man schalte alle falschen, zeitraubenden und nutzlosen Bewegungen aus. Fünftens: Nach Beseitigung aller unnötigen Bewegungen stelle man die schnellsten und besten Bewegungen (...) tabellarisch in Serien geordnet zusammen.« (Taylor 1911: 125f.) Diese von aller Verschwendung, von allem Bewegungsüberfluß gereinigten Handgriffe sind dann die Vorgabe, an die sich der Arbeiter zu halten hat. Zusammen mit der dazu benötigten Zeit bilden sie die Norm, von der her sich der Lohn (bzw. die Prämie) bemißt.

Taylors Bewegungsanalysen sind eine wesentliche Voraussetzung für die Fragmentierung und Mechanisierung der Arbeit. Ein komplexer Arbeitsablauf wird in seine elementaren Bestandteile zerlegt und anschließend aufgeteilt auf verschiedene, dafür spezialisierte Hände, Arme oder Beine. Was sie zu tun haben, ist genau fixiert, von der Bewegung her wie von der Zeit, die dafür bemessen ist. Die fordistische Fabrikorganisation treibt dieses Prinzip dann auf die Spitze. Ihr Demonstrationsobjekt waren die Fabrikhallen in Detroit, wo Henry Ford sein berühmtes Modell T produzieren ließ. Fords Grundidee war einfach und verdankt Taylors Vorüberlegungen einiges. Ein komplexes Produkt, ein Auto z.B., läßt sich Stück für Stück aus standardisierten Einzelteilen zusammensetzen, und zwar schrittweise in einer genau kalkulierten Abfolge von einfachen Arbeitsoperationen. Der Zerlegung des Produktionsprozesses in einfache Arbeitsoperationen entspricht auf der Seite der Arbeiter eine extreme Spezialisierung: ihre Arbeit wird auf einfache Handgriffe reduziert. Das hat Vorteile, wie Ford seinen Lesern vorrech-

1978; für England vgl. Urwick/Brech 1957, insb. Kap. VII, Vol. II; und für die Schweiz Jaun 1986.

net. Von den 7882 verschiedenen Verrichtungen, die man in seiner Fabrik zählen konnte, ließen sich »670 Arbeiten von Beinlosen, 2637 von Einbeinigen, 2 von Armlosen, 715 von Einarmigen, 10 von Blinden verrichten« (Ford 1923: 126). Von Köpfen ist nicht die Rede. In der fordistischen Fabrikhalle braucht es keine mehr.[18]

Hatte sich Taylor noch auf den einzelnen Arbeiter konzentriert, so hat Henry Ford nun den 'Gesamtarbeiter' im Blick. Die Frage ist nicht mehr: wie läßt sich ein Arbeitsgang, ein Handgriff, rationalisieren. Das ist bereits geschehen. Sondern: wie fügt man sie zusammen zu einer möglichst reibungslos funktionierenden Maschinerie? Das Fließband mit seinem Takt bietet dafür die Lösung. Gegenüber Taylors Methode weist die fordistische Fabrikhalle eine entscheidende Vereinfachung auf: das Problem der Zeitkontrolle ist hier mechanisch gelöst. Was in Taylors System der 'speed boss' zu tun hatte, wird nun durch das Fließband besorgt. In der Fordschen Fabrik brauche es, wie Friedrich von Gottl-Ottlilienfeld 1925 schwärmerisch schrieb, keine Stoppuhr mehr. Denn der Arbeiter werde »vom Rhythmus des Betriebes« getragen »in Gestalt jener wundervollen Anordnung«, dem Fließband nämlich, aus dem die Arbeiter »gleich Fischern (...) ihr Werkzeug herausangeln, um es nach ihrem Handgriff wieder dem Stromlauf zu übergeben. Sie passen sich dabei in ihrem Tempo wie von selber dem geregelten Lauf des Gerinnes an.« (Gottl-Ottlilienfeld 1925: 11; 17)[19]

Was bei Gottl-Ottlilienfeld zu einem pastoralen Genrebild geriet, sah in Wirklichkeit etwas prosaischer aus. Egon Erwin Kisch beschreibt das Fließband als Band, »an das Menschen geflochten sind« (zit. in Schütz 1977: 54), und einen ähnlich trostlosen Eindruck vermittelt auch ein Schweizer Fabrikinspektoren-Bericht aus dem Jahr 1921/22: »Der Arbeiter muß auf ein Zeichen, das eine Uhr nach je 39 Sekunden gibt, das

---

18 Ford hat bekanntlich noch einiges mehr gemacht als bloß Fabriken reorganisiert. Sein Name ist vor allem mit der Durchsetzung eines Produktionsparadigmas verbunden, das Massenproduktion und Massenkonsum auf folgenreiche Weise gekoppelt hat, doch spielt dieser Aspekt in meinem Zusammenhang keine Rolle; vgl. dazu u.a. Piore/Sabel 1985.

19 Gottl-Ottlilienfeld war damals nicht der einzige, der auf Fluß- und Naturmetaphern zurückgriff, um die neue Technik zu beschreiben. Die Naturmetaphorik war in dieser Zeit ein beliebtes Stilmittel, um den Leserinnen und Lesern einen Eindruck von der Neuheit und den gigantischen Ausmaßen der Detroiter Fabrikhallen zu vermitteln. Darauf spielt auch Egon Erwin Kisch, einer der wenigen kritischen Berichterstatter, an, wenn er in seiner Amerika-Reportage das Fließband ironisch mit einem »Alpenbach« vergleicht. Vgl. zur Rezeption der 'amerikanischen' Produktionsmethoden in der zeitgenössischen Reportage und Literatur, Schütz 1977; 1988.

Stück an den Nachbarn zur Linken weitergeben (...), während er von dem zur Rechten ein neues zugeschoben erhält. Die Serie von Personen bildet einen geschlossenen Block, der von der Uhr kommandiert wird und in gewissem Grade ganz zwangsläufig arbeitet, wie ein Mechanismus.« (Zit. in Jaun 1986: 193) Ganz zwangsläufig wie ein Mechanismus. Genau so wie der Postsche Arbeiter und Turings Maschine. Ein Werkstück kommt von links, der Arbeiter A führt eine Bewegung aus, macht einen Handgriff, das Stück bewegt sich nach rechts zu Arbeiter B. Dieser führt wiederum eine Bewegung aus, und so weiter, im Takt. Alles ist vorgeschrieben, vorbestimmt – die Bewegung, die man auszuführen hat, und die Zeit, die dafür bemessen ist.

Taylor und Ford haben die Fabrikhallen verändert – und die Menschen, die ihnen zu arbeiten haben. »Krümelmonster« hat Ruedi Lüscher das fordistisch zersplitterte Subjekt genannt (Lüscher 1988). Taylor und Ford haben aber auch das Denken verändert. Sie führten vor, daß sich menschliches Handeln zerlegen läßt in Kleinstelemente, die dann beliebig verteilbar sind auf Menschen oder auf Maschinen. Handeln meint hier Bewegung, Körperbewegung. Diese wurde beobachtet, gemessen, zergliedert und nach rationalen Gesichtspunkten neu zusammengesetzt. Turing hat auf *mentale* Prozesse übertragen, was Taylor und Ford noch auf körperliche Bewegungen beschränkt hatten. Das Turingmodell (und das gilt auch für das Modell von Post) ist, pointiert formuliert, die Anwendung des tayloristischen Prinzips auf kognitive Prozesse. Komplexe mentale Prozesse werden in einfache Grundoperationen zerlegt, in mentale Handgriffe sozusagen, und dann gemäß der algorithmischen Vorschrift sequentiell aneinandergereiht: Das Fließband im Gehirn. Turing hat aus Denken einen mechanischen Prozeß gemacht und die Differenz eingeebnet zwischen geistigem Höhenflug und gedanklicher Simplizität. Auch die genialste Gedankenfolge, ein schwieriger mathematischer Beweis z.B., läßt sich zerlegen in einfache Operationen – in Operationen, die so stumpfsinnig sind, daß sogar eine Maschine dazu imstande ist. Intelligenz wird dabei nicht vorausgesetzt, ebensowenig wie bei dem Menschen, der mechanisch einer Anweisung folgt.

Turing ist in einer Welt aufgewachsen, in der sich die Organisation der Arbeit verändert hat – dank Taylor und Ford. Wieweit ihre Prinzipien tatsächlich umgesetzt wurden, in welchem Ausmaß auch, das ist eine schwierige Frage, und ihre Beantwortung differiert von Land zu Land. Aber auch wenn ihre praktische Wirkung vielleicht geringer war, als die beiden es sich gewünscht hätten, so wurde zumindest öffentlich darüber diskutiert. Daß Aldous Huxley die Zeitrechnung in seiner Schönen Neuen Welt mit der Geburt »Unseres Herrn Ford« beginnen läßt, ist symptomatisch für die Bedeutung, die man dem fordistischen Projekt damals zumaß (Huxley 1932). Was Ford und Taylor propagierten, was teilweise in den Fabriken geschah, das wurde rezipiert, nicht nur in den Medien, auch in der Kunst, in der Literatur und im Film. In 'Modern Times' hat Charlie Chaplin dem Fordismus ein kulturelles Denkmal gesetzt, und in gewissem Sinne hat das auch Turing getan. Im selben Jahr, nota bene. Ein Jahr zuvor, 1935, hatte der *International Congress for Scientific Management* in London getagt und damit dem Taylorismus in England eine Publizität verschafft, die er in den 20er Jahre, als man auf dem Festland in ihm die Rettung sah, noch nicht gehabt hatte.[20] Die schwere Depression Anfang der 20er Jahre habe zu einer »vollkommen apathischen Stimmung« geführt, schreibt Lyndall Urwick, selbst ein emsiger Promotor tayloristischen Gedankenguts. Niemand habe Lust gehabt zu neuen Unternehmungen (Urwick/Brech 1957, Vol. II: 44).[21] Das änderte sich 1932, als in England, früher als in den meisten anderen Ländern, ein wirtschaftlicher Aufschwung einsetzte, der bis 1937 andauerte. Er war, zumindest in den führenden Industriesektoren, von erheblichen Unstrukturierungen und Investitionen begleitet, zu denen nicht zuletzt auch jene Maßnahmen gehörten, die Taylor und Ford entwickelt hatten (Aldcroft 1986). 1934 führte Morris, der damals größte Automobilkonzern in England, das Fließband ein[22], und 1937 kam es, ausgelöst durch den Londoner Kongreß, zur Gründung des *British Management Councils*, dem ersten nationalen Zusammenschluß der bis anhin lokal operierenden Taylor-Gruppen (Urwick/Brech 1957, Vol. I: 111).

Obgleich das, zugestandenermaßen, nur verzettelte Hinweise sind, scheinen sie mir doch die These zu plausibilisieren, daß die Überlegungen, zu denen Turing gelangte, nicht allein mathematikintern zu erklären sind. Turings mathematische Vorstellungswelt, und das gilt gleicher-

---

20 Zur verzögerten Rezeption des Taylorismus in England vgl. die Hinweise in Urwick 1930: 41ff. sowie in Urwick/Brech 1957, Vol. I: 111.

21 Lyndall Urwick, ein Engländer, war der erste Direktor des 1927 gegründeten *Internationalen Rationalisierungs-Instituts* in Genf, das in seinen Statuten die wissenschaftliche Betriebsführung zwar nicht explizit erwähnte, ihr aber stark verpflichtet war; vgl. Wren 1987: 202. Die Statuten sind abgedruckt in Devinat 1927: 275ff.

22 Zur Diffusion der Fließproduktion in einzelnen europäischen Ländern vgl. die Hinweise in Fridenson 1978. Morris war zwar nicht der erste englische Automobilkonzern, der die Fließproduktion einführte, aber der größte. Das erste Fließband wurde 1925, also ebenfalls vergleichsweise spät, bei Austin installiert.

maßen auch für jene von Post, weist eine erstaunliche Nähe zu Konzepten auf, wie sie im Rahmen der Rationalisierungsbewegung entwickelt, diskutiert und implementiert wurden. Turing hat auf mentale Prozesse übertragen, was sich in der klassischen Rationalisierung noch ausschließlich auf Körperbewegung bezog. Mit ihm wird Taylor zum Opfer seiner eigenen Theorie. Taylor hatte sich und seinen Kopf noch ins Planungsbüro gerettet. Dort meinte er, vor seinem eigenen Programm in Sicherheit zu sein. Turing hat den Taylorismus zu Ende gedacht – *alles* läßt sich aufspalten und anschließend mechanisieren. Nicht bloß Bewegungen, auch das Denken.

Kapitel 5

# Orientierungskrisen

## *Zum Zusammenhang von sozialer Krise und Grundlagenkrise in der Mathematik*

> Den Himmel wollten wir stürmen und haben nur Nebel auf Nebel getürmt, die niemanden tragen, der ernsthaft auf ihnen zu stehen versucht.
>
> *Hermann Weyl*[1]

> Für die Soziologie der Wissenschaft ist wichtig festzustellen, daß große Denkstilumwandlungen, also bedeutsame Entdeckungen sehr oft in Epochen allgemeiner sozialer Wirrnis entstehen.
>
> *Ludwik Fleck*[2]

Der Formalismus gilt neben dem intuitionistischen und dem logizistischen Programm als eine der drei Antworten auf die Antinomien, die man um die Jahrhundertwende in der naiven Mengenlehre entdeckt hatte. So will es zumindest die konventionelle Geschichte der sog. Grundlagenkrise. Die Widersprüche, die man entdeckt hatte, waren jedoch nicht von Anfang an und für alle ein gravierendes Problem. Sie wurden erst im Verlaufe der Zeit als ein solches interpretiert, und erst zwanzig Jahre später, zu einer Zeit also, als nicht nur die Mathematik geprägt war von Krisenbewußtsein und Unsicherheit, schienen sie für viele auf die Brüchigkeit des mathematischen Fundamentes hinzuweisen. Damit wurde die Forderung nach einem Nachweis der Widerspruchsfreiheit der Mathematik dringlicher. David Hilbert hatte zwar bereits zu Beginn des Jahrhunderts eine Strategie skizziert, um Widersprüche zu vermeiden, seine Haltung ihnen gegenüber bleibt aber gelassen. Widersprüche sind ein Problem – der Nachweis der Widerspruchsfreiheit der Mathematik ist ihm sogar das zweitwichtigste unter den 23 Problemen, die er 1900 der internationalen mathematischen Gemeinschaft zur künftigen Bearbeitung vorlegt –, aber sie sind lösbar. Nirgends findet sich ein Hinweis darauf, daß ihn das Problem der Widersprüche zu dieser Zeit tiefer beunruhigte.

Das änderte sich in den frühen 20er Jahren. Den Auftakt machte ein Aufsatz von Hermann Weyl, in dem das Problem seinen Namen bekam: *Über die neue Grundlagenkrise der Mathematik* (Weyl 1921). Für Her-

1 Weyl 1921: 170.
2 Fleck 1935: 124f.

mann Weyl, einem ehemaligen Schüler Hilberts und seit 1913 Ordinarius an der ETH Zürich, waren die mengentheoretischen Antinomien mehr als bloße »Ruhestörungen« in den »entlegensten Provinzen des mathematischen Reiches«. Sie galten ihm als Indizien für die »innere Haltlosigkeit der Grundlagen, auf denen der Aufbau des Reiches ruht«, der nur, so Weyl, mit einer »Revolution« beizukommen sei, mit einer grundsätzlichen Neubegründung der Mathematik, so wie er sie in den Arbeiten seines holländischen Kollegen L.E.J. Brouwer angelegt sah (Weyl 1921: 143; 158). Obschon Weyl sich später von seinem »bombastischen Stil« distanzierte und ihn zurückführt auf »die Stimmung einer aufgeregten Zeit – der Zeit unmittelbar nach dem ersten Weltkrieg« (Weyl 1955: 179), weisen seine Formulierungen darauf hin, daß die Grenze zwischen Mathematik und Welt zu dieser Zeit brüchig geworden war: Die Antinomien wurden zu einem ausdrucksstarken Symbol für die Zersetzung lebensweltlicher Gewißheit, und umgekehrt prägte die Krise der Zeit die Einschätzung des Stellenwerts von Widersprüchen.

Was zu Beginn des Jahrhunderts als lösbares Problem definiert worden war, das die Sicherheit des Fundamentes, auf dessen Boden die Mathematiker ihre Arbeit taten, nicht prinzipiell erschütterte, wurde in den frühen 20er Jahren als grundsätzliche Bedrohung interpretiert. Hilbert begann das Programm, das er Anfang des Jahrhunderts erst skizziert und dann liegengelassen hatte, systematisch auszuarbeiten. In Einklang mit seinem erkenntnistheoretischem Optimismus war er zwar immer noch der Ansicht, daß es »einen völlig befriedigenden Weg (gibt), den Paradoxien zu entgehen«, aber sie wurden von ihm nun gleichwohl zunehmend als Problem empfunden: »Man denke: in der Mathematik, diesem Muster von Sicherheit und Wahrheit, führen die Begriffsbildungen und Schlüsse, wie sie jedermann lernt, lehrt und anwendet, zu Ungereimtheiten. Und wo soll sonst Sicherheit und Wahrheit zu finden sein, wenn sogar das mathematische Denken versagt?« (Hilbert 1925: 88)

Gewißheit zu finden, zumindest im Bereich der Mathematik, diesem »Muster von Sicherheit und Wahrheit«, war das eine Motiv, weshalb Grundlagenfragen für Hilbert in den 20er Jahren in den Vordergrund rückten. Ein anderer Grund war die Tatsache, daß das von L.E.J. Brouwer entwickelte intuitionistische Gegenprogramm in dieser Zeit immer mehr Anhänger fand, auch unter Hilberts ehemaligen Schülern. Auf diese Konkurrenz reagierte Hilbert mit einer systematischen Ausarbeitung seines eigenen Programms, in das er, ohne dies allerdings explizit zu erwähnen, intuitionistische Elemente aufnahm. Die

Beweistheorie (oder Metamathematik), die Hilbert nach dem Ende des 1. Weltkrieges entwickelte und die erst zu dieser Zeit ihren Namen bekam, ist ein Versuch, seine bereits 1904 formulierten Grundüberzeugungen in Einklang zu bringen mit einem Teil der Kritik, so wie sie von intuitionistischer Seite formuliert worden war (vgl. Kap. 1).

Als *Krise* war die Grundlagenkrise beschränkt auf die frühen 20er Jahre, und sie war eine Krise, die in einem engen Zusammenhang stand zur sozialen Krise dieser Zeit. Zeitlich parallel zur politischen und sozialen Stabilisierung gewannen auch die Mathematiker ihre Sicherheit zurück. Die Debatte wurde beigelegt, ohne daß sie zu Ende geführt worden wäre. Die Probleme blieben erhalten, nachweislich erhalten, wie Kurt Gödel 1931 zeigte, aber sie stellten sich nicht mehr als Probleme in den Weg. Man richtete sich ein auf den Grundlagen, wie brüchig diese auch immer waren, und überließ die Grundlagenforschung einem kleinen Kreis von Spezialisten. Die Grundlagenkrise ist damit ein Beispiel für das, was Hansjörg Siegenthaler als 'Orientierungskrise' bezeichnet (Siegenthaler 1993). Diesem Zusammenhang möchte ich im folgenden etwas ausführlicher nachgehen.

## 1. Widersprüche als praktisches Problem

> So darf doch der Zugang zur Mathematik nicht über die langwierigsten und halsbrecherischsten Hochgebirgspfade führen, so daß die Mehrzahl aller Beschreiter unterwegs scheitern müßte, die wenigen aber, denen es gelänge, deren Schwierigkeiten zu überwinden, zu Tode erschöpft ankämen, und zwar nicht am Ziele, sondern dort, wo nun die eigentliche Mathematik erst beginnen soll.
>
> *Hans Hahn*[3]

Am Anfang der Grundlagenkrise stand die Entdeckung des italienischen Mathematikers Cesare Burali-Forti (1861 – 1931). Im Jahr 1897 publizierte Burali-Forti eine Arbeit, in der er zeigte, daß aus den Annahmen der Cantorschen Mengenlehre ein Widerspruch resultiert. In die Literatur ist dieser Widerspruch als Widerspruch der größten Ordinalzahl eingegangen.[4] In der Folge davon wurde eine Reihe weiterer, ähnlich gelagerter Widersprüche entdeckt, u.a. von Georg Cantor selbst, und den Höhepunkt schließlich erreichte die Entdeckung der Antinomien mit der be-

3 Hahn 1919: 68.
4 Zum Begriff der 'Ordinalzahl' vgl. S. 32, Anm. 25.

rühmten Antinomie von Bertrand Russell, die er 1903 publizierte, ein Jahr zuvor aber bereits Gottlob Frege und Giuseppe Peano mitgeteilt hatte. Als Reaktion auf diese Entdeckung wurden verschiedene grundlagentheoretische Programme entwickelt, die je auf ihre Weise die Gefahr der Widersprüche zu bannen suchten. Formalismus und Intuitionismus sind damit direkte Antworten auf die Antinomien, die Burali-Forti und seine Nachfolger in der Cantorschen Mengenlehre entdeckt hatten.

So stellt sich die Geschichte der Antinomien aus der Perspektive der 'Standard-Interpretation' der Grundlagenkrise dar.[5] Daß mit Burali-Fortis Widerspruch die Debatte um die Antinomien ihren Anfang nahm, gehört dabei zu den Kernstücken dieser Erzählung. »Thus it may surprise the reader to learn«, so Gregory J. Moore und Alejandro Garciadiego, »that Burali-Forti did *not* publish a paradox in 1897, or at any other time.« (Moore/Garciadiego 1981: 320) Was aber hat er dann publiziert? Burali-Forti versuchte zu beweisen, daß die Menge aller Ordinalzahlen nicht existiert. Zu diesem Beweis gelangte er mit Hilfe einer *reductio ad absurdum* und dazu konstruierte er, wie bei dieser Beweisstrategie üblich, einen Widerspruch. In Burali-Fortis Arbeit von 1897 taucht also tatsächlich ein Widerspruch auf, aber, und das ist der entscheidende Punkt, dieser Widerspruch war in den Augen von Burali-Forti keine Antinomie.[6] Dazu wurde er erst allmählich durch die Deutungsarbeit der nachfolgen-

5 Ich halte mich hier an die Nach-Erzählung der 'Standard-Interpretation' durch Alejandro R. Garciadiego, der angesichts neuerer Literatur zum Schluß gelangt, daß die Geschichte der Grundlagenkrise neu zu schreiben sei, insbesondere auch was die Gründe für die Entwicklung der formalistischen bzw. intuitionistischen Auffassung der Mathematik anbelangt: »One must question the role of the paradoxes in the origin and development (...) of the modern schools of thought in mathematics.« (Garciadiego 1986: 40) Vgl. dazu auch Mehrtens 1984; Mehrtens 1990, insb. Kap. 2.2. und Kap. 4.1, an dessen Neudeutung der Grundlagenkrise ich mich folgenden orientiere.

6 Die Argumentation von Moore und Garciadiego beruht wesentlich auf ihrer begrifflichen Unterscheidung von 'contradiction' und 'paradox'. Ein 'Widerspruch' (=contradiction) läßt sich problemlos auflösen, indem man eine der Prämissen aufgibt (wie es die *reductio ad absurdum* ja auch bezweckt), eine 'Paradoxie' (=paradox) ist dagegen ein Argument, das in einem Widerspruch endet, obwohl alle Prämissen und Schlußfolgerungen akzeptabel erscheinen und folglich auch nicht auf den ersten Blick zu sehen ist, welche davon aufgeben werden soll. Oder wie es Bertrand Russell in seiner *Autobiographie* in Hinblick auf die von ihm entdeckte Antinomie formulierte: »Irgend etwas stimmte nicht, wenn solche Widersprüche bei ordnungsgemäßen Voraussetzungen unvermeidlich waren.« (Russell 1972: 227) Die berühmte Lügner-Antinomie ist ein Beispiel für ein solches 'paradox'. Was Moore und Garciadiego im Englischen als 'paradox' bezeichnen (und auch die Mathematiker im ersten Drittel des Jahrhunderts noch 'Paradoxie' nannten), wird heute im allgemeinen als 'Antinomie' bezeichnet. Ich halte mich im folgenden an die heutige Sprachregelung.

den Mathematiker, die den von Burali-Forti konstruierten Widerspruch mit der Zeit umdefinierten in eine Antinomie: »Burali-Forti's paradox (= Antinomie, B.H.) originated not all at once, but little by little, primarily through the labors of Bertrand Russell (...) In fact, both what was stated and what was meant by the paradox underwent a transformation in the hands of English, French, German, and Italian mathematicians during the decade following 1897. The process by which Burali-Forti's paradox originated, diffused, and metamorphosed into a form recognizable to mathematicians today was essentially complete by 1907.« (Moore/Garciadiego 1981: 321)

Der Widerspruch, den Burali-Forti konstruierte und mit dem aus der Perspektive der 'Standard-Interpretation' die Geschichte der modernen Antinomien ihren Anfang nahm, war also in seinen Augen keine Antinomie, und auch nicht aus der Sicht seiner Zeitgenossen. Giulio Vivante, der 1900 die Arbeiten von Burali-Forti aus dem Jahr 1897 für das *Jahrbuch über die Fortschritte der Mathematik* zusammenfaßte, erwähnt nichts von einer Antinomie, und auch von anderswoher gab es mehrere Jahre lang keine Reaktion auf die Arbeit von Burali-Forti.[7] Erst Bertrand Russell machte aus Burali-Fortis Widerspruch eine Antinomie: »The first explicit statement of Burali-Forti's paradox, as a *paradox*, occurred in Russell's book *The Principles of Mathematics*.« (Moore/Garciadiego 1981: 324) Aber sogar Russell war sich der Bedeutung seiner Antinomie zunächst nicht ganz bewußt.

Was also in konventioneller Sicht als objektive Ursache der Grundlagenkrise gilt, hat es so nie gegeben. Der Widerspruch, den Burali-Forti konstruiert hatte, mußte erst auf spezifische Weise gedeutet werden, bis er den Status einer Antinomie erhielt, und auch dann dauerte es noch eine ganze Weile, bis die mengentheoretischen Antinomien zum Symbol einer grundlegenden Krise der Mathematik wurden. Zudem war Burali-Forti nicht der erste und auch nicht der einzige Mathematiker, dem es gelang, einen mengentheoretischen Widerspruch zu konstruieren. Bereits einige Jahre zuvor hatte Georg Cantor festgestellt, daß aus seinem Mengenbegriff ein Widerspruch resultiert, und dies in einem Brief auch David Hilbert (1897) und Richard Dedekind (1899) mitgeteilt, am Rande aller-

7 Auch nicht von seiten Cantors, dem, wie Walter Purkert und Hans Joachim Ilgauds vermuten, Burali-Fortis Widerspruch bekannt war. Der Grund für diese ausbleibende Reaktion war wohl der, daß er ihren Inhalt längst kannte (Purkert/Ilgauds 1987: 147f.).

dings nur und ohne Zeichen großer Aufregung.[8] Ähnlich gelassen reagierte auch Hilbert selbst. 1903 schreibt er an Frege, daß ihm dessen Beispiel einer Antinomie bekannt sei: »Ihr Beispiel am Schlusse des Buches ist uns hier bekannt. Ich glaube vor 3 – 4 Jahren fand es Dr. Zermelo auf die Mitteilung meiner Beispiele hin; andere noch überzeugendere Widersprüche fand ich bereits vor 4 – 5 Jahren.« (Hilbert an Frege, in Frege 1976: 79f.)

Hilbert bezog sich in seinem Brief auf das Beispiel der Russellschen Antinomie (vgl. S. 33), das Frege im Nachwort seines 2. Bandes der *Grundgesetze der Arithmetik* anführt. Ernst Zermelo, auf den Hilbert verweist, hatte die 'Russellsche' Antinomie bereits 1899 entdeckt, sie aber – ähnlich wie Cantor und Hilbert – nie veröffentlicht (Rang/Thomas 1981). Bezeichnenderweise, möchte man sagen. B. Rang und W. Thomas geben zwei Gründe dafür an, weshalb Zermelo seine Antinomie nicht publizierte: Zum einen habe er die Implikationen seiner Antinomie auf Freges Begründung der Arithmetik nicht einschätzen können, da er dessen Arbeiten zu wenig kannte. Zum anderen seien ihm aufgrund seiner Kenntnis des von Burali-Forti konstruierten Widerspruchs die Probleme der naiven Mengenlehre so vertraut gewesen, daß die von ihm entdeckte Antinomie für ihn bloß eine Bestätigung von schon Bekanntem und nicht eine neue Einsicht war. Angesichts der Tatsache, daß Burali-Fortis Arbeit niemanden groß zu kümmern schien und offenbar auch Russell die Implikationen seiner Antinomie nicht ganz einzuschätzen vermochte (vgl. weiter unten), scheint mir eine dritte Erklärung nicht unplausibel zu sein: Zermelo hat die von ihm gefundene Antinomie nie erwähnt, auch nicht in seinen Briefen, weil ihm – und ähnlich schien es auch Hilbert und Cantor gegangen zu sein – ihre Implikationen nicht weiter problematisch erschienen (vgl. auch Moore 1978).

Burali-Forti hat seinen Widerspruch nicht als Antinomie empfunden, Georg Cantor hat darauf mit einer Neudefinition des Mengenbegriffs reagiert (indem er nun zwischen 'konsistenten' und 'inkonsistenten Vielheiten' unterschied), Ernst Zermelo maß seiner Entdeckung offenbar keine Bedeutung zu, und Hilbert sprach widerspruchsvollen Begriffen ganz

8 Der Brief an Hilbert aus dem Jahr 1897 ist der erste schriftliche Beleg dafür, daß Cantor sich der Problematik seiner Mengendefinition durchaus bewußt war. Wie die Formulierung in diesem Brief deutlich macht, war Cantor schon einige Jahre früher auf Widersprüche aufmerksam geworden, nur schienen sie ihn nicht weiter beunruhigt zu haben. Vgl. dazu ausführlicher Purkert/Ilgauds 1987: 150ff. Zur gelassenen Reaktion Cantors auf die mengentheoretischen Antinomien vgl. auch Menzel 1984 sowie Moore/Garciadiego 1981: 331ff.

einfach mathematische Existenz ab.[9] Niemand aber schien durch die Widersprüche weiter beunruhigt gewesen zu sein. Erst mit der Publikation der Russellschen Antinomie ändert sich der Ton, die Reaktionen bleiben aber weiterhin mehrheitlich pragmatisch ausgerichtet, und daran wird sich bis in die frühen 20er Jahre kaum etwas ändern. Zudem scheint auch Russell seine Antinomie nicht auf einen Schlag entdeckt zu haben. Erst aufgrund der Reaktion Gottlob Freges, dem er sie 1902 in einem Brief mitteilte, wurde er ihrer Bedeutung gewahr. »Ihre Entdeckung des Widerspruchs«, schreibt Frege in seinem Antwortbrief an Russell, »hat mich auf's Höchste überrascht und, fast möchte ich sagen, bestürzt, weil dadurch der Grund, auf dem ich die Arithmetik aufzubauen dachte, in's Wanken geräth.« (Frege an Russell, in Frege 1976: 213) Bis zu diesem Zeitpunkt war Russell offenbar noch der Ansicht, daß sich seine Antinomie ohne große Schwierigkeiten auflösen lasse: »When Russell, in June 1901, found the paradox which now bears his name, he failed at first to recognize its importance. Apparently he wrote to no one about it at the time (...) It was the fact that Frege, whom Russell admired intensely, regarded Russell's paradox as devastating that helped to convince him of its importance.« (Moore/Garciadiego 1981: 328)[10]

Mit der Publikation von Russells Antinomie, zunächst im bereits erwähnten Nachwort Freges zum zweiten Band seiner *Grundgesetze der Arithmetik*, dann in Russells *The Principles of Mathematics* selbst, bekamen die mengentheoretischen Antinomien einen größeren Stellenwert in den Diskussionen der Mathematiker. Die Reaktionen blieben aber weitgehend sachlich, und die Art, mit der man über die Antinomien sprach, hatte noch längst nicht den skandalisierten Ton angenommen, wie er dann für die frühen 20er Jahre bezeichnend werden sollte. Bertrand Russell machte sich daran, seine sog. 'Typentheorie' zu entwickeln, Hilbert skizzierte in seinem Heidelberger-Vortrag sein beweistheoretisches Programm (läßt es dann aber wieder für Jahre liegen), Richard Dedekind,

---

9 In seinem Vortrag *Mathematische Probleme* gibt Hilbert im Zusammenhang mit seiner Forderung, einen Widerspruchsfreiheitsbeweis für die Arithmetik zu führen, seiner Zuversicht Ausdruck, daß sich die Existenz (definiert als Widerspruchsfreiheit, vgl. Kap. 1) der »höheren Cantorschen Zahlklassen und Mächtigkeiten« nachweisen lasse – »im Gegensatz zu dem System aller Mächtigkeiten überhaupt oder auch aller Cantorschen Alephs, für welches, wie sich zeigen läßt, ein widerspruchsloses System von Axiomen in meinem Sinn nicht aufgestellt werden kann, und welches daher nach meiner Bezeichnungsweise ein mathematisch nicht existierender Begriff ist.« (Hilbert 1900a: 301)

10 Russell selbst stellt diese Geschichte in seiner Autobiographie allerdings um einiges heroischer dar (Russell 1972: 226f.; 233f.).

der 1903 eine Neuauflage seines Buches *Was sind und was sollen die Zahlen?* abgelehnt hatte mit der Begründung, daß sich in der Zwischenzeit »Zweifel an der Sicherheit wichtiger Grundlagen meiner Auffassung« eingestellt hätten, stimmt ihr acht Jahre später zu[11], und Ernst Zermelo legt 1908 ein Axiomensystem für die Mengenlehre vor, mit der Widersprüche, wie sie Russell, Burali-Forti, Hilbert und er selbst gefunden hatten, ein für allemal ausgeschlossen waren.

Die mengentheoretischen Antinomien, wie sie Cantor, Hilbert, Zermelo und Russell gefunden hatten, hatten ein Merkmal gemeinsam: Alle gingen sie vom Cantorschen Begriff der Menge aus, und dieser ließ, wie es Abraham Fraenkel in seiner mengentheoretischen Vorlesung formulierte, die »Bildung allzu umfassender Mengen« zu, wie etwa die Menge *aller* Mengen oder die Menge *aller* transfiniten Ordinalzahlen, die in sich widerspruchsvoll waren (Fraenkel 1927: 115).[12] Eine Strategie, solche Widersprüche auszuschließen, bestand folglich darin, auf eine Definition des Begriffs der 'Menge' ganz zu verzichten und statt dessen die zulässigen Mengenbildungen durch ein geeignetes axiomatisches System festzulegen. Dies hat Ernst Zermelo 1908 mit seiner Axiomatisierung der Mengenlehre getan. Die Grundüberlegung dieser Strategie, Widersprüche auszuschließen, stammt aus Hilberts formaler Axiomatik: »Man wendet, um diesen Begriff (den naiven Begriff der Menge, B.H.) zu ersetzen, die axiomatische Methode an«, so John von Neumann, der später selbst eine Axiomatik der Mengenlehre entwickelte. »D.h. man konstruiert eine Reihe von Postulaten (= Axiome, B.H.), in denen das Wort 'Menge' zwar vorkommt, aber ohne jede Bedeutung. Unter 'Menge' wird hier (im Sinne der axiomatischen Methode) nur ein Ding verstanden, von dem man nicht mehr weiß und nicht mehr wissen will, als aus den Postulaten über es folgt. Die Postulate sind so zu formulieren, daß aus ihnen alle erwünschten Sätze der Cantorschen Mengenlehre folgen, die Antinomien aber nicht.« (Von Neumann 1925: 36)

11 Dedekind 1888 in seinem Vorwort zur dritten Auflage von 1911. Und er fährt fort: »Die Bedeutung und teilweise Berechtigung dieser Zweifel verkenne ich auch heute nicht. Aber mein Vertrauen in die innere Harmonie unserer Logik ist dadurch nicht erschüttert.« Dedekinds Arbeit war von den Antinomien insofern betroffen, als auch er einen problematischen Mengenbegriff verwendet hatte.

12 Zur Erinnerung: »Unter einer 'Menge' verstehen wir jede Zusammenfassung M von bestimmten wohlunterschiedenen Objekten m unserer Anschauung oder unseres Denkens (welche die 'Elemente' von M genannt werden) zu einem Ganzen.« (vgl. S. 32).

Mit der Axiomatisierung der Mengenlehre waren Widersprüche, wie sie aus dem Cantorschen Mengenbegriff folgten, ein für allemal ausgeschlossen. Das konkrete Problem, das die Antinomien aufgeworfen hatten, war damit an und für sich gelöst. In 'quasi-empirischer' Manier hatte man das theoretische System solange revidiert, bis die 'Anomalien' ausgeschaltet waren. Damit wurden allerdings nur jene Widersprüche erfaßt, die aus Cantors Mengendefinition resultierten. Die prinzipielle Gefahr von Antinomien war damit nicht gebannt. Um in diesem Punkt Sicherheit zu erlangen, bedarf es einer anderen, einer grundlegenderen Strategie, so wie sie je auf ihre Weise David Hilbert und L.E.J. Brouwer entwickelt haben. Es ist, anders formuliert, eine Sache, Widersprüche, die bekannt sind, zu vermeiden, aber eine ganz andere (und sehr viel problematischere), Widersprüche ein für allemal auszuschließen. Entsprechend war denn auch die Suche nach 'absoluter' Gewißheit längst nicht immer ein prioritäres Ziel in der mathematischen Grundlagenforschung. Wenn Haskell B. Curry, ein amerikanischer Logiker und ehemaliger Doktorand von Hilbert, die Frage stellt: »But does mathematics need absolute certainty for its justification?« und sie anschließend negativ beantwortet, dann zeigt er damit eine alternative Position an: »We adopt a theory so long as it makes useful predictions and modify or discard it as soon as it does not. This is what has happened to mathematical theories in the past, where the discovery of contradictions had led to modifications in the mathematical doctrines accepted up to the time of that discovery. Why should we not do the same in the future?« (Zit. in Lakatos 1967: 25) Damit ist ein 'quasi-empirischer' Standpunkt formuliert, wie er, zumindest in den Augen von Imre Lakatos, die Haltung des 'working mathematician' in der Regel kennzeichnet (vgl. Kap. 3.2.).

Es gab allerdings Phasen, in denen die Mathematiker nicht so gelassen reagierten. Nicht immer begnügten sie sich mit Widerspruchsfreiheit auf Widerruf. Es gab eine Zeit, wo ihnen die Suche nach absoluter Gewißheit ein zentrales Anliegen war, und diese Zeit fiel in eine Phase, in der Gewißheit und Sicherheit auch außerhalb der Mathematik zu einem Problem geworden waren. Doch in den Jahren nach der Publikation der Russellschen Antinomie war dies noch nicht der Fall. Es überwog eine 'quasi-empirische', eine pragmatische Haltung. David Hilbert legt zwar 1904 in einem Vortrag dar, wie ein absoluter Widerspruchsfreiheitsbeweis für die Arithmetik zu führen wäre, und er nimmt dabei auch explizit Bezug auf die mengentheoretischen Antinomien, aber gleichwohl machen seine Ausführungen nicht den Anschein großer Beunruhigung (Hilbert 1905). Im

Unterschied zu seinem berühmten Pariser-Vortrag vier Jahre zuvor, in dem er die Forderung nach einem Widerspruchsfreiheitsbeweis noch mit den Anforderungen seiner formalen Axiomatik begründet hatte[13], rückt er jetzt zwar die Antinomien in den Vordergrund – die »Vermeidung solcher Widersprüche und die Klärung jener Paradoxien« gelten ihm als »Hauptziel« der Untersuchungen über den Zahlbegriff –, dennoch bleibt der Ton gelassen und die Prognose für die Zukunft zuversichtlich: »Ich bin der Meinung, daß alle die berührten Schwierigkeiten sich überwinden lassen und daß man zu einer strengen und völlig befriedigenden Begründung des Zahlbegriffes gelangen kann, und zwar durch eine Methode, die ich die axiomatische nennen und deren Grundidee ich in der folgenden Mitteilung kennzeichnen möchte; eine strenge und konsequente Durchführung und Entwicklung der Methode behalte ich mir vor.« (Hilbert 1905: 265f.)

Was Hilbert damals noch als 'axiomatische Methode' bezeichnete, nannte er später 'Beweistheorie' oder 'Metamathematik'. An ihre »strenge und konsequente Durchführung und Entwicklung« machte er sich allerdings nicht sofort, sondern erst in den frühen 20er Jahren. In der Zwischenzeit publizierte er nichts mehr zu diesem Thema.[14] Der Vortrag sei damals »völlig unverstanden« geblieben, berichtet Otto Blumenthal in seiner *Lebensgeschichte*. Zudem hätte sich Hilberts Versuch »bei genauerem Eingehen als unzulänglich« erwiesen (Blumenthal 1935: 422). Und Paul Bernays schreibt in seinem Aufsatz zum sechzigsten Geburtstag Hilberts, daß »diese Ausführungen dem Verständnis große Schwierigkeiten« geboten hätten und »auch manchen Anfeindungen« ausgesetzt gewesen seien. Seitdem aber habe Hilbert »seinen Plan weiterverfolgt und seinen Ideen eine faßliche Form« gegeben (Bernays 1922: 97).

Für Volker Peckhaus markiert der Heidelberger-Vortrag einen entscheidenden Wendepunkt in Hilberts grundlagentheoretischen Arbeiten, der zurückzuführen sei auf die Entdeckung der Antinomien: »Es ist anzunehmen, daß die Katastrophe in der Fregeschen logistischen Begründung von Arithmetik und Analysis, die nach Bertrand Russells Publikation der nach ihm benannten Antinomie im Jahre 1903 öffentlich geworden war, den entscheidenden Anstoß für die zweite Phase des Hilbertschen Pro-

13 Zum Zusammenhang zwischen formaler Axiomatik und der Notwendigkeit, einen Widerspruchsfreiheitsbeweis zu führen, vgl. Kap. 1.

14 Hilbert griff dieses Thema allerdings immer wieder in Vorlesungen auf und setzte sich auch wissenschaftspolitisch für die Grundlagenforschung ein, konkret vor allem für die Arbeit von Ernst Zermelo; vgl. dazu ausführlicher Peckhaus 1990.

gramms gegeben hat.« (Peckhaus 1990: 40) Aber auch wenn man konzediert, daß die Publikation, d.h. das Öffentlichwerden der – Hilbert ja bereits bekannten – mengentheoretischen Antinomien (und die spezifische Formulierung, die Russell ihnen gab), Hilbert zu seinem Heidelberger-Vortrag motivierte, ist damit noch nicht erklärt, was denn der neuerliche Anstoß dafür war, daß sich Hilbert Ende des 1. Weltkrieges erneut grundlagentheoretischen Arbeiten zuwandte und weshalb seine Ausführungen zu dieser Zeit einen so aufgeregten Ton annehmen: »Und wo soll sonst Sicherheit und Wahrheit zu finden sein, wenn sogar das mathematische Denken versagt?« (Hilbert 1925: 88)

## 2. Krise und Stabilisierung

> Die Eisdecke war in Schollen zerborsten, und jetzt ward das Element des Fließenden bald vollends Herr über das Feste.
>
> *Hermann Weyl*[15]

> Und wird mir das ganze
> Getu hier zu trist,
> Dann kauf ich mir'ne Kanone
> Und werde Putschist.[16]

Brouwer war Hilbert 1909 zum ersten Mal persönlich begegnet, damals noch mit ungebrochener Bewunderung. Er habe in diesem Sommer den »ersten Mathematiker der Welt« getroffen, schrieb er seinem Freund Carel Adema van Scheltema begeistert. »Now I have repeatedly walked with him, and talked to him as a young apostle to a prophet.« (Zit. in van Dalen 1990: 18) Bis Ende des 1. Weltkrieges war die Beziehung zwischen Brouwer und Hilbert freundschaftlich und von gegenseitigem Respekt geprägt. »The relation Hilbert-Brouwer until 1920 can only be described as friendship and mutual admiration«, stellt Walter P. van Stigt

15 Weyl 1925: 528.

16 Dies eine Strophe aus einem längeren 'Poem', das 1927, im Jahr als Brouwer in Berlin eine Gastvorlesung hielt, in einer Berliner Studentenzeitschrift erschien und (mehr oder minder) ironisch Brouwers Attacke gegen das Prinzip des *tertium non datur* aufs Korn nimmt: »Ja klassisch da schließen's/mit falschem Genie:/Sie mag net die andern/ Drum mag's also mi.//Wir Putschisten aber sagen/Des stimmt net deswegen,/Denn sie braucht nämlich leider/ Überhaupt keinen z'mögen.« (Zit. in van Stigt 1990: 95) Als 'Putschisten' wurden damals die Intuitionisten bezeichnet – in Allusion an Hilberts Verdikt: »Nein, Brouwer ist nicht, wie Weyl meint, die Revolution, sondern nur die Wiederholung eines Putschversuchs mit alten Mitteln.« (Hilbert 1922: 15)

in seiner umfassenden Brouwer-Studie fest (van Stigt 1990: 56). Brouwer sei für ihn »a scholar of singular talent, of the most wide-ranging and richest knowledge and of an exceptionally penetrating mind«, schreibt Hilbert 1911 in einem Gutachten zuhanden von Brouwers ehemaligem Doktorvater D.J. Korteweg (zit. in van Stigt 1990: 56). Und umgekehrt wurde Göttingen mit der Zeit für Brouwer zu einer Art zweiten geistigen Heimat. 1914 wird er in das Beratergremium der u.a. von Hilbert herausgegebenen *Mathematischen Annalen* aufgenommen und vier Jahre später wird er zum Mitglied der Göttinger *Gesellschaft der Wissenschaft* ernannt.[17] Noch 1918 schreibt Brouwer an Hilbert, daß dessen Arbeiten sein eigenes Denken ganz entscheidend beeinflußt hätten: »I shall never forget (...) that the wealth of knowledge and inspiration which I gained from your work have played a decisive role in my mathematical development.« (Zit. in van Stigt 1990: 70) Ein Jahr später erhält Brouwer auf Betreiben von Hilbert einen Ruf nach Göttingen (den er allerdings ablehnt), und er selbst schickt Hilbert eine Postkarte mit dem freundschaftlichen Gruß: »From two admirers of the scholar and friends of the man – L.E.J. Brouwer, C.Carathéodory.« (Zit. in van Stigt 1990: 80)

Bis zu diesem Zeitpunkt hatten die unterschiedlichen grundlagentheoretischen Auffassungen, die Hilbert und Brouwer vertraten, keine Auswirkungen gehabt auf ihre Beziehung. Beide waren sich bewußt, daß sie in gewichtigen Punkten anderer Ansicht waren, aber diese Meinungsdifferenz vermochte ihre gegenseitige Anerkennung nicht zu tangieren. Wenn Brouwer den Formalismus attackierte, wie z.B. in seiner Antrittsvorlesung von 1912, erwähnte er Hilbert nie namentlich, und ähnlich sprach er von den Intuitionisten immer nur in der 3. Person. Das ändert sich 1919. Den Anfang macht Brouwers *Begründung der Mengenlehre unabhängig vom logischen Satz vom ausgeschlossenen Dritten*, die er 1918 und 1919 in zwei Teilen vorlegt. Mit dieser Arbeit, in der Brouwer die klassische Mengenlehre intuitionistisch aufzubauen sucht, wird die Differenz zu Hilbert unübersehbar. Brouwer habe zwar die Konfrontation zunächst noch zu vermeiden versucht, schreibt Walter van Stigt, aber im selben Jahr, als der 2. Teil seiner Arbeit erscheint, publiziert Brouwer unter dem Titel *Intuitionistische Mengenlehre* einen populärer gehaltenen Aufsatz, in dem er sich zum ersten Mal explizit als 'Intuitionisten' bezeichnet. Dieser Aufsatz sei, so Walter van Stigt, ein »publicity pam-

17 'Gesellschaft der Wissenschaft' ist die Bezeichnung Brouwers in seinem Dankesbrief an Hilbert, zit. in van Stigt 1990: 70. Gemeint war vermutlich die von Klein begründete *Göttinger Vereinigung zur Förderung der angewandten Physik und Mathematik*.

phlet« gewesen, »an open declaration of his true intuitionist colours« (van Stigt 1990: 82).

Brouwer hatte sein grundlagentheoretisches Programm zum ersten Mal 1907 in seiner Dissertation ausgeführt. Seine intuitionistische Begründung der Mathematik schien damals allerdings weniger durch das Problem der Antinomien motiviert gewesen zu sein als vielmehr durch seine philosophischen Grundüberzeugungen (vgl. Kap. 1.2.). In seiner Antrittsvorlesung von 1912, die, so Walter van Stigt, »signals his return to the battlefield of the Foundations of Mathematics« (van Stigt 1990: 61), werden die Antinomien zwar erwähnt, als notwendige Folge eines allzu sorglosen Umgangs mit dem Unendlichen, im Vordergrund steht jedoch die sehr viel allgemeinere Frage nach der Natur der mathematischen Gegenstände und ihrer Rechtfertigung. Was Brouwer damals erst als Programm skizziert hatte, eine rein konstruktive Herleitung der Mathematik, baut er im »Zweiten Akt des Intuitionismus« (van Stigt) systematisch aus. Aus einer philosophisch gefärbten Absichtserklärung wird ein konkretes mathematisches Arbeitsprogramm.

Den Anfang macht seine bereits erwähnte *Begründung der Mengenlehre*. Hermann Weyl, der diese Arbeit als einer der ersten gelesen hatte, gibt – in einer gewissermaßen öffentlichen Erklärung – seine eigene Begründung der Analysis auf und übernimmt Brouwers Argumentation: »So gebe ich also jetzt meinen eigenen Versuch preis und schließe mich Brouwer an (...) Brouwer – das ist die Revolution!« (Weyl 1921: 158) In einer Reihe von Vorträgen, die er 1920 in Zürich hielt, macht Weyl die Brouwersche Sicht des Kontinuums und der Mengenlehre einem breiteren Publikum bekannt, mit Formulierungen zum Teil, die darauf hinweisen, daß zu dieser Zeit Gesellschaftliches in das abgeschlossene Reich der Mathematik einzudringen vermochte. Da ist die Rede von der »inneren Haltlosigkeit der Grundlagen, auf denen der Aufbau des Reiches beruht«, von der »drohenden Auflösung des Staatswesens der Analysis«, von »Revolution«, von »Papiergeld« und »Papierwirtschaft« (Weyl 1921: 143; 157f.) – Metaphern, die erst vor dem Hintergrund der damals einsetzenden massiven inflationären Entwertung der 'Papiermark' ihre Bedeutung bekommen.[18] Die Papierwelt des mathematischen Formalismus war in

18 Weyl hatte seine Vortragsreihe 1920 unter den Sammeltitel *Über die neue Begründung der Mathematik* gestellt. Für die Publikation ein Jahr später änderte er den Titel. Statt 'Begründung' sprach er nun bezeichnenderweise von 'Krise' (van Stigt 1990: 76).

den Augen der Intuitionisten so wenig wert wie die Papiermark, die sich Tag für Tag mehr entwertete.[19]

Hilbert reagierte auf diese intuitionistische 'Offensive' 1922 mit einem Aufsatz, dem er den Titel *Neubegründung der Mathematik* gab und in dem er sein beweistheoretisches Programm systematisch ausarbeitete. Auch er läßt dabei Begriffe einfließen, die dem politischen Diskurs dieser Zeit entliehen sind. Was Hermann Weyl als 'Revolution' feierte, wird von Hilbert als 'Putschversuch' abqualifiziert: »Nein: Brouwer ist nicht, wie Weyl meint, die Revolution, sondern nur die Wiederholung eines Putschversuches mit alten Mitteln, der seinerzeit, viel schneidiger unternommen, doch gänzlich mißlang und jetzt zumal, wo die Staatsmacht durch Frege, Dedekind und Cantor so wohl gerüstet und befestigt ist, von vornherein zur Erfolglosigkeit verurteilt ist.« (Hilbert 1922: 15) Muß man angesichts dieser Rhetorik nicht annehmen, »that both Weyl and Hilbert at the very least saw close parallels between the crisis in mathematics and the political crisis then wracking Germany, that their sense of the significance of the mathematical issues was colored by their perceptions of the political issues, that perhaps this crisis in mathematics depended for its very existence upon the social-intellectual atmosphere in the aftermath of Germany's defeat?« (Forman 1971: 61) Dies die Frage von Paul Forman, der in seiner anregenden Untersuchung über die Entwicklung der Quantenmechanik in den 20er Jahren darlegt, wie sehr die theoretischen Vorstellungen der Physiker dieser Zeit beeinflußt waren vom kulturell-politischen Klima der frühen Weimarer Republik. Die Kausalitätsdebatte in der Physik, die dem Durchbruch der Quantenmechanik Mitte der 20er Jahre voranging und ihn vorbereitete, war in Formans Augen eine defensive Anpassung an die damals herrschende, kulturpessimistisch gefärbte Rationalitäts- und Wissenschaftskritik, wie sie am prominentesten Oswald Spengler vertreten hat – »an effort by German physicists to adapt the content of their science to the values of their intellectual environment.« (Forman 1971: 7)

Für das Zeitgefühl dieser Epoche symptomatischer als die politische Rhetorik, die auf einmal in den strengen Abhandlungen der Mathematiker auftauchte, scheint mir jedoch der Stellenwert zu sein, den die Antino-

19 Im Januar 1920 betrug das Verhältnis Papiermark zu Goldmark 15:1, im Januar 1922 war es auf 46:1 gestiegen und bis zum Dezember schnellte es auf 1808:1 hoch. Als am 15. November 1923 die 'Rentenmark' eingeführt wurde, setzte die Reichsregierung folgende Parität fest: 1 US-Dollar entsprach dem Wert von 4,2 Billionen Papiermark (Möller 1990: 155f.).

mien – und mit ihnen die Sicherheit des mathematischen Fundamentes – in dieser Zeit bekamen, nicht nur bei Hilbert, Brouwer oder Weyl, sondern bei vielen Mathematikern dieser Zeit. Zwischen 1920 und 1923, berichtet Richard Baldus 1924, hätten die Diskussionen um die Grundlagen der Mathematik »immer breiteren Raum« eingenommen, und es seien keineswegs nur »unklare Schwärmer« gewesen, sondern »Mathematiker, die erhebliche Leistungen aufzuweisen haben«, denen das Fundament, auf dem sie arbeiteten, auf einmal unsicher erschien (zit. in Mehrtens 1990: 291). »Die Eisdecke war in Schollen zerborsten, und jetzt ward das Element des Fließenden bald vollends Herr über das Feste«, wie Hermann Weyl das Gefühl dieser Zeit in Worte zu fassen suchte (Weyl 1925: 528). »Ich möchte der Mathematik den alten Ruf der unanfechtbaren Wahrheit, der ihr durch die Paradoxien der Mengenlehre verloren zu gehen scheint, wiederherstellen«, schreibt Hilbert 1922 (Hilbert 1922: 15), und seinen im September desselben Jahres gehaltenen Vortrag *Die logischen Grundlagen der Mathematik* leitet er mit den Worten ein: »Meine Untersuchungen zur Neubegründung der Mathematik bezwecken nichts Geringeres, als die allgemeinen Zweifel an der Sicherheit des mathematischen Schließens definitiv aus der Welt zu schaffen.« (Hilbert 1923: 33)

Weshalb werden die Antinomien erst in den frühen 20er Jahren als gravierendes Problem empfunden, und auch dann nur für kurze Zeit? Weshalb findet Brouwers Mathematik gerade in dieser Zeit – und nur in dieser – so große Resonanz? Christian Thiel hat als erster die Frage aufgeworfen, ob ein Zusammenhang besteht zwischen der Grundlagenkrise der Mathematik und der »Krise der Zeit«, sie aber negativ beantwortet: »Für den Fall der mathematisch-logischen Grundlagenkrise (stellen wir uns) im folgenden auf den Standpunkt, daß eine entscheidende Abhängigkeit nicht anzunehmen ist.« (Thiel 1972: 26) Ganz anders Paul Forman: »The notion and mood of crisis«, wie sie für diese Zeit typisch war, habe auch die Wahrnehmungsweise der Mathematiker geprägt. »In fact, in this period, both mathematics and physics – but above all German mathematicians and physicists – went through deep and far-reaching crises, whose very definitions showed the most intimate relation with the principal currents of the Weimar intellectual milieu.« (Forman 1971: 58; 60) Ähnlich stellt auch Herbert Mehrtens eine Beziehung her zwischen dem Krisendiskurs in der Mathematik und der Nachkriegskrise in Deutschland: »Das Gefühl der großen Krise nach dem Schock von Weltkrieg und Revolution, damit die unausweichliche Frage, wie Sinn und Ordnung wiederherzustellen seien, erfaßten in Deutschland auch die Mathematiker (...) Die 'Grundlagenkrise' der Mathematik war vor allem ein Ereignis, das etwa 1920 bis 1925 in Deutschland stattfand. Die Fragen nach Begründbarkeit, Wahrheit und Sinn der Mathematik waren eng verkoppelt mit den sozialen und politischen Fragen der Zeit. In der Suche nach Positionen verschränkten sich viele Diskurse, metaphorisch verstrebt in 'Staatswesen', 'Papiergeld', 'Gerechtigkeit' und vor allem dem Wort 'Krise'.« (Mehrtens 1990: 290; 295)

Was Forman und Mehrtens auf eine singuläre historische Konstellation zurückführen, läßt sich auch etwas allgemeiner formulieren. Ich beziehe mich dabei auf Hansjörg Siegenthalers Theorie sozialen Wandels (u.a. Siegenthaler 1993). Siegenthaler, dessen Theorie ich hier nur soweit referiere, wie es für meinen Zusammenhang notwendig ist, entwickelt eine zyklische Theorie sozialen Wandels, deren primäres Ziel es ist, ein theoretisches Modell bereitzustellen für die in modernen Gesellschaften regelmäßig wiederkehrenden Wachstums- und Modernisierungskrisen. Siegenthaler unterscheidet zwischen zwei Phasen – zwischen *Krisenphasen*, verstanden als Phasen sozialer und kognitiver Offenheit, aber auch Desorientierung, in denen Deutungsmuster, mit denen man bislang problemlos operiert hatte, in Zweifel gezogen werden, mit Folgen für die Handlungsfähigkeit der Akteure, und *Strukturperioden*, d.h. Phasen hoher struktureller Stabilität, in denen das Entscheidungsvertrauen wieder hergestellt und die Handlungsfähigkeit zurückgewonnen ist. Die Grundannahme ist dabei die, daß die Diskontinuität sozialen Wandels, die Abfolge von strukturell stabilen Wachstumsperioden und offenen Krisenphasen, eine regelhafte und zwingende Erscheinung moderner westlicher Gesellschaften ist. In Phasen struktureller Stabilität werden die Bedingungen für den Umschlag in die Krise geschaffen, und umgekehrt bilden sich in Krisenphasen die Grundlagen für die nachfolgende Restabilisierung heraus. Krisen sind, anders formuliert, eine notwendige Begleiterscheinung sozialen Wandels, und nicht bloß zufällige Einbrüche in den ansonsten kumulativen Prozeß der Modernisierung.

Vom Standpunkt des Individuums aus gesehen sind Krisen gesellschaftliche Phasen, in denen vieles, was gewiß war, problematisch wird – die eigene Form der Weltauslegung, soziale Institutionen, die Vertrauenswürdigkeit von Bezugspersonen. Es sind Phasen, in denen es schwer fällt, sich ein Bild der Gegenwart zu machen und für die Zukunft eine Prognose zu stellen. Wo vieles geschieht und nichts gewiß ist, wo die Welt gestaltbar erscheint, aber gleichzeitig auch unsicher. In Krisenphasen wird das Verhältnis von Erfahrung und Erwartung problematisch. Das Vertrauen darauf, daß man aus vergangenen Erfahrungen auf zukünftige Entwicklungen schließen kann, wird zunehmend in Zweifel gezogen. Dies hat Konsequenzen für die Handlungsfähigkeit der Individuen. Denn wenn die Welt auf einmal als undurchschaubar erscheint, weil der früheren Sicht der Dinge nicht mehr zu trauen ist, sind Entscheidungen schwierig zu treffen. Orientierungskrisen blockieren mit anderen Worten die Handlungsfähigkeit der Individuen, und das hat einschneidende gesamtgesellschaftliche Folgen. Entscheidungen werden aufgeschoben, Investitionen nicht getätigt, Ressourcen nicht gebunden. Wirtschaftliche Einbrüche sind die Folge davon. Oder anders formuliert: Wirtschaftliche Depressionen sind nicht Ursache einer Krisenphase, sondern, gerade umgekehrt, deren Konsequenz.

Entsprechend ist das Zurückgewinnen von Vertrauen in die Angemessenheit der eigenen Wirklichkeitskonstruktion ein entscheidendes Moment bei der Überwindung der Krise. Dem kommunikativen Handeln kommt hier eine Schlüsselstellung zu. Im Rahmen von Kommunikationsgemeinschaften – von sozialen Bewegungen z.B. – werden neue Deutungen entwickelt und vor allem auch gegenseitig validiert. Einsames Nachdenken verhilft, wie Siegenthaler schreibt, »zu neuen Einsichten, zu *Vertrauen* in solche Einsichten verhilft es nicht« (Siegenthaler 1987: 256). Dazu braucht es – wie auch der Symbolische Interaktionismus plausibel begründet –, soziale Interaktion, in deren Verlauf *gemeinsames* Wissen entwickelt wird. Im Verlauf von Kommunikationsprozessen, die von ihrer Struktur her jenen in der Wissenschaft gar nicht so unähnlich sind (vgl. Kap. 3), werden nicht nur neue Sichtweisen entwickelt, sondern vor allem auch mit Glaubwürdigkeit versehen. Im sozialen Prozeß der Verständigung wird Vertrauen zu den neuen Deutungsmustern hergestellt, mit denen man sich die intransparent gewordene Welt wieder verständlich zu machen sucht (Siegenthaler 1987).[20] Nachher jedenfalls sieht die soziale Wirklichkeit anders aus. Oder um Thomas Kuhn zu paraphrasieren: nach sozialen Krisenphasen antwortet man auf eine andere Welt (Kuhn 1962: 151).

Mit dem Wiedererlangen von Orientierungssicherheit gewinnen die Akteure auch ihre Entscheidungs- und Handlungsfähigkeit wieder zurück.

20 Damit ist freilich noch nichts über die Adäquatheit der neuen Deutungsmodelle ausgesagt. Was für wissenschaftliche Theorien gilt, gilt erst recht für Alltagstheorien: Was Menschen denken, hat keinen ausreichenden Grund im Gegenstand ihres Denkens (vgl. dazu ausführlicher Kap. 3).

Strukturperioden sind gekennzeichnet durch ein verbreitetes Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Zukunft. Wirtschaftlicher Aufschwung ist die Folge davon. Gleichzeitig werden in solchen Wachstumsphasen jedoch auch die Bedingungen für ihre Unterminierung geschaffen. Krisen sind ein integraler Bestandteil von Modernisierungsprozessen. Denn Wachstumsprozesse sind gleichzeitig auch Umverteilungsprozesse. Im Zuge von sozialen Wandlungsprozessen kommt es, anders formuliert, zu einer Verschiebung im relativen Wert des jeweiligen Sach- und Fähigkeitskapitals, von der die einzelnen in sehr ungleichem Maße betroffen sind (Siegenthaler 1984: 128). Es gibt Wachstumsgewinner, aber auch Verlierer. Auf die Veränderung ihrer strukturellen Chancen reagieren die betroffenen Individuen mit einer (rationalen) Anpassung ihrer Handlungsstrategien, und diese Veränderungen im individuellen Verhalten verstärken ihrerseits den Eindruck, daß sich die Welt in einem rasanten Tempo bewegt. D.h. Phasen struktureller Stabilität sind 'stabil' nur in Hinblick auf die jeweiligen Strukturparameter, bewegungslos sind sie nicht. Sie gehen einher mit einem rapiden sozialen und ökonomischen Wandel und führen immer auch zu sozialer Desintegration.

Siegenthalers Theorie ist ein Versuch, die mikrosoziologische Ebene der Handlungstheorie mit der makrosoziologischen (bzw. -ökonomischen) Ebene des sozialen Wandels zu verbinden, und zwar über das Konzept der nicht-intendierten Handlungsfolgen. Theoretisch erklärt sich der Mechanismus zyklischen Wandels über die Unterscheidung von deutungsabhängigem intentionalem Handeln und nicht-intendierten Handlungsfolgen. Intentionales Handeln kann Folgen zeitigen, die von den Individuen nicht intendiert wurden. Aggregiert führen solche nicht-intendierten Handlungsfolgen zu sozialen Wandlungsprozessen, die als solche nicht beabsichtigt waren und sich unter Umständen zunächst einmal dem Wahrnehmungshorizont der Individuen entziehen. Wenn viele Eltern ihre Kinder in höhere Schulen schicken, sinkt damit die Instrumentalität von Bildung und ebenso ihr Distinktionswert. Nach Abschluß der Schule merkt man vielleicht, daß sich in der Zwischenzeit der Ertrag, den Bildung bringt, verändert hat.

Ohne von den Individuen beabsichtigt zu sein, verändert sich die soziale Realität, bis schließlich für einzelne Gruppen merkbar wird, daß sich ihre Zukunftspläne nicht mehr erfüllen lassen und die hergebrachten Deutungsmuster nur noch beschränkt tauglich sind zur Deutung der Gegenwart und zur Einschätzung der Zukunft. Die strukturellen Möglichkeiten stehen nicht mehr in Einklang mit den gesellschaftlich sanktionierten Zielen, bewährte Handlungsroutinen stoßen auf Widerstand – es häufen sich die 'Anomalien' des Alltagslebens. Ähnlich wie im Falle wissenschaftlicher Theorien löst Zweifel an der Angemessenheit des persönlichen Weltentwurfes zunächst einmal Unsicherheit aus. Die Welt scheint anders zu sein, als man gedacht hatte; Ziele, auf die man gesetzt hatte, lassen sich nicht erfüllen. Was bislang als selbstverständlich galt, gerät in den Sog von Relativierungen. Das Fundament, auf dem man sich bis anhin sicher bewegte, wird brüchig. Immer häufiger werden Dinge thematisiert und problematisiert – Normen, Deutungsmuster, Institutionen, kollektive Ziele und politische Spielregeln –, die man lange Zeit für selbstverständlich hingenommen hatte. Was man bislang der Welt als Eigenschaft zugerechnet hat, entpuppt sich auf einmal als Konstruktion. Den Menschen in Phasen raschen sozialen Wandels geht es ähnlich wie den Exilanten bei Alfred Schütz: Das Hineingestelltwerden in eine neue Welt läßt die alte Welt als kontingent erscheinen (Schütz 1972).

Gleichzeitig bedeutet Krise aber immer auch Erkenntnischance. Auf diesen Zusammenhang hat besonders Karl Mannheim hingewiesen. Für Mannheim war die Entstehung der Wissenssoziologie eine direkte Folge des Fraglichwerdens der 'Wirklichkeit' in einer Zeit der Krise.[21] In seinem 1929 erschienenen Buch *Ideologie und Utopie* beschreibt Mannheim sehr eindrücklich die Gefühlslage, die für Orientierungskrisen kennzeichnend ist. Es sind diese historisch kurzen Momente, in denen die Wirklichkeit kontingent wird, die in den Augen von Mannheim das Terrain vorbereiten für eine Soziologie des Wissens: »Es ist geradezu Gebot der Stunde, die jetzt gegebene Zwielichtbeleuchtung, in der alle Dinge und Positionen ihre Relativität offenbaren, zu nützen, um ein für allemal zu wissen, wie alle jene Sinngebungsgefüge, die die jeweilige Welt ausma-

21 Zu einem ganz ähnlichen Schluß gelangte übrigens auch Edmund Husserl einige Jahre später: »Ist nicht ein Zusammenbruch möglich der ganzen Menschengemeinschaft, in welchem nicht nur ich, sondern wir alle in diese Grenzsituation hineingeraten könnten: auf nichts mehr ist Verlaß«, schrieb er 1931 in seiner *Phänomenologie der Intersubjektivität*. Was als Befürchtung anklingt, empfand Husserl gleichzeitig aber auch als Chance. Denn die Krise, die er konstatierte, enthüllte auf einen Schlag die Fiktion einer objektiv gegebenen Welt. Sie förderte gewissermaßen von selbst zutage, wozu der Transzendentalphilosoph nur ihn mühsamster Reduktionsarbeit gelangt: »Das Sein der Welt hat nur einen Anschein von Festigkeit, in Wahrheit ist es die Festigkeit eines Normalgebildes. Aber eben von daher erwächst, sowie dieser Instabilitätsmodus entdeckt oder mindestens fühlbar wird, die höchste Weltfrage, das philosophische Fraglichwerden der Welt überhaupt in ihrer Totalität, und zwar radikal verstanden, alle Horizonte lüftend und in die Frage einbeziehend.« (Zit. in Matthiesen 1984: 14f.)

chen, eine geschichtliche, sich verschiebende Kulisse sind (...) Es gilt in diesem historischen Augenblick, wo alle Dinge plötzlich transparent werden und die Geschichte ihre Aufbauelemente und Strukturen geradezu enthüllt, mit unserem wissenschaftlichen Denken auf der Höhe der Situation zu sein, denn es ist nicht ausgeschlossen, daß allzubald – wie dies schon in der Geschichte öfter der Fall war – diese Transparenz verschwindet und die Welt zu einem einzigen Bilde erstarrt.« (Mannheim 1929: 76f.) Die Wissenssoziologie ist eine Sicht auf die Welt, die eine hohe Affinität aufweist zum Lebensgefühl in einer Zeit der Krise. Deshalb ist es auch kein Zufall, daß sie in den 20er Jahren begründet wurde, später lange Zeit stagnierte, und erst in den 70er Jahren, als die Wirklichkeit ein weiteres Mal brüchig geworden war, einen neuen Aufschwung erfuhr (vgl. ähnlich auch Stehr/Meja 1980: 16f.).

Gesellschaftliche Krisenphasen müssen sich nicht immer in parallelen wissenschaftlichen Umbrüchen äußern. Aber auch wenn der Zusammenhang kein notwendiger ist, so kann doch vermutet werden, daß in Reaktion auf die gesellschaftliche Krisenerfahrung auch in der Wissenschaft die Sensibilität für 'Anomalien' wächst. Dies gilt besonders für jene Gruppen von (jungen) Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen, die – z.B. aufgrund ihres Alters und ihres Status – erst partiell in das System der Wissenschaft integriert sind und aus diesem Grund außerwissenschaftlichen Prägungen gegenüber noch offener sind. Daß die Kuhnsche Theorie wissenschaftlicher Entwicklung von einem ähnlichen zyklischen Muster ausgeht wie die hier vorgestellte Theorie gesellschaftlicher Entwicklung, ist vielleicht doch mehr als ein Zufall. Die mathematische Grundlagenkrise scheint mir jedenfalls ein gutes Beispiel zu sein für diesen Zusammenhang.

In Deutschland waren die Jahre von 1920 bis 1923/24 Jahre einer tiefgreifenden Krise. 1924 setzte dann eine vorläufige Stabilisierung ein, die bis 1929 dauerte (Möller 1990: 138ff.; Peukert 1987: 191ff.). Die Krise der frühen 20er Jahre in Deutschland war eine Krise nicht nur in ökonomischer Hinsicht, sondern es war auch eine soziale und kulturelle Krise. Ihr Ursprung liegt nicht allein in den gravierenden ökonomischen und politischen Probleme, die aus dem verlorenen Krieg und dem Zusammenbruch der alten Ordnung resultierten; sie war zuallererst eine *Modernisierungskrise*, wie sie zu dieser Zeit auch andere Länder durchmachten (vgl. etwa für die Schweiz Ernst/Wigger 1991). Entsprechend setzte die Krise nicht erst nach dem Ende des 1. Weltkriegs ein und sie wurde durch diesen auch nicht ursächlich ausgelöst. Vielmehr zeigen sich erste Anzeichen einer Krise bereits in den Jahren vor dem 1. Weltkrieg, und die Gründe für die beginnende Destabilisierung sind jene, die ich oben beschrieben habe. Der Krieg und sein für Deutschland prekäres Ende bringen bloß zum Ausbruch, was schon vorher latent angelegt gewesen war (vgl. Peukert 1987).[22]

Die frühen 20er Jahre waren eine Zeit, in der der Konflikt zwischen Moderne und Gegenmoderne eine neuen Höhepunkt erreichte. Es war eine Zeit, in der die Modernisierung zwar weiter vorangetrieben, ihre Wünschbarkeit aber gleichzeitig immer radikaler angezweifelt wurde. Die gegenmoderne Bewegung der 20er Jahren griff die Ambivalenzerfahrungen der Moderne auf und gab ihnen über weite Strecken eine rückwärtsgewandte Deutung. In Oswald Spenglers *Untergang des Abendlandes* fand die zivilisationsmüde Kritik an der modernen Gesellschaft ihren damals wohl wortgewaltigsten Ausdruck (Spengler 1923). Spengler war der Exponent einer breiten modernisierungskritischen Bewegung, die sich, wie Theodor Geiger 1931 schrieb, gegen die »'Mechanisierung' und 'Atomisierung' des sozialen Lebens auflehnte (...) und sich in jäher Wendung dem Irrationalismus und der Fühlsamkeit hingab« (zit. in Käsler 1991: 524). Dieser »neuromantische Zivilisationspessimismus« war der Boden, auf dem Spenglers Publikumserfolg gedieh – und Tönnies' Begriffspaar endgültig eine reaktionäre Deutung erfuhr.

Eine erste, noch sehr rudimentäre Fassung von Spenglers Buch erschien 1918. Vier Jahre später legte er eine umfassende Neubearbeitung vor. Zu diesem Zeitpunkt war die erste Version bereits in mehr als 30 Auflagen erschienen, 1926 hatte die 1923 erschienene Neubearbeitung eine Auflage von mehr als 100 000 Exemplaren erreicht (und dies trotz der Papierknappheit, die den Mathematikern so zu schaffen machte). Spengler kritisierte, was als Erfahrungsbasis den mathematischen Formalismus mitgeprägt hatte (vgl. Kap. 4): den um sich greifenden Rationalismus, die Zergliederung sozialer und natürlicher Abläufe, die 'Maschi-

22 Aus diesen theoretischen Überlegungen folgt, daß die Grundlagendebatte nicht, wie Forman und Mehrtens behaupten, ein spezifisch deutsches Phänomen war. Die Sicherheit der mathematischen Grundlagen müßte in allen anderen Ländern, die zu dieser Zeit eine Modernisierungskrise durchmachten, in ähnlicher Weise zu einem Problem geworden sein, z.B. auch in der Schweiz. Daß die mathematische Grundlagenkrise als typisch deutsches Phänomen erscheint, hat so gesehen weniger mit der Spezifik der deutschen Verhältnisse zu tun als vielmehr damit, daß Deutschland damals noch Mittelpunkt der Mathematik war. Diese These müßte anhand eines systematischen Vergleichs des Verlaufs und der Intensität der Grundlagendebatte in verschiedenen anderen Ländern natürlich noch genauer überprüft werden. Ich kann das hier nicht tun.

nenhaftigkeit' der gesellschaftlichen Verhältnisse und deren 'Seelenlosigkeit'. Dies alles war ihm Zeichen dafür, daß sich mit der »westeuropäisch-amerikanischen Zivilisation« das Abendland vollendet hatte. Im welthistorischen Zyklus war es »Winter« geworden. Und 'Winter' hieß für Spengler: »Anbruch der weltstädtischen Zivilisation. Erlöschen der seelischen Gestaltungskraft. Das Leben selbst wird problematisch. Ethisch-praktische Tendenzen eines irreligiösen und unmetaphysischen Weltstädtertums.« (Spengler 1923: 70f.) Von seinem Anspruch her war Spenglers mehr als tausend Seiten starkes Buch ein Versuch, die Geschichte des (untergehenden) Abendlandes neu zu schreiben und die ihr inhärente Logik zu entziffern – die Gesetze der Geschichte aufzudecken. Es waren jedoch weniger seine historischen Spekulationen als vielmehr seine fulminante Kritik an der Moderne, und nicht zuletzt an der modernen Wissenschaft, die Spenglers Buch in breiten Kreisen zu solcher Resonanz verhalf.

'Kausalität versus Leben', 'Kausalitätsprinzip versus Schicksalsidee' war das Begriffspaar, das Spenglers Wissenschafts- und Rationalitätskritik leitete. Das Kausalitätsprinzip der Naturwissenschaft galt ihm als Inbegriff eines starren, seelenlosen Mechanismus, und dessen Vorherrschen bewies in seinen Augen, daß sich die abendländische Kultur ihrem Ende zuneigte. Den positiven Gegenpol zur »starren Weltmaske der Kausalität« bildete das Lebendige, Seelenhafte – die 'Schicksalsidee': »Die Schicksalsidee verlangt Lebenserfahrung, nicht wissenschaftliche Erfahrung, die Kraft des Schauens, nicht Berechnung, Tiefe, nicht Geist (...) Kausalität ist das Verstandesmäßige, Gesetzhafte, Aussprechbare, das Merkmal unsres gesamten verstehenden Wachseins. Schicksal ist das Wort für eine nicht zu beschreibende innere Gewißheit. Man macht das Wesen des Kausalen deutlich durch ein physikalisches oder erkenntniskritisches System, durch Zahlen, durch begriffliche Zergliederung. Man teilt die Idee eines Schicksal nur als Künstler mit, durch ein Bild, durch eine Tragödie, durch Musik. Das eine fordert eine *Unterscheidung,* also Zerstörung, das andre ist durch und durch *Schöpfung*. Darin liegt die Beziehung des Schicksals zum Leben, der Kausalität zum Tod.« (Spengler 1923: 153f.)

Spenglers zyklische Theorie historischer Entwicklung beruht auf der Annahme, daß jede Kultur ein abgeschlossenes – und vor allem unvergleichbares, inkommensurables – Ganzes bildet. »Jede Kultur«, so Spengler in seiner Einführung, »hat ihre neuen Möglichkeiten des Ausdrucks, die erscheinen, reifen, verwelken und nie wiederkehren. Es gibt viele, im tiefsten Wesen völlig voneinander verschiedene Plastiken, Malereien, Mathematiken, Physiken, jede von begrenzter Lebensdauer, jede in sich selbst geschlossen, wie jede Pflanzenart ihre eigenen Blüten und Früchte, ihren eigenen Typus von Wachstum und Niedergang hat.« (Spengler 1923: 29) Spenglers Position ist strikt kulturrelativistisch, und sein Relativismus macht auch vor der Mathematik nicht halt: »Es gibt keine Mathematik, es gibt nur Mathematiken«, schreibt er in einem Kapitel mit der bezeichnenden Überschrift *Vom Sinn* (!) *der Zahlen.* »Eine Zahl an sich gibt es nicht und kann es nicht geben. Es gibt mehrere Zahlenwelten, weil es mehrere Kulturen gibt.« (Spengler 1923: 82; 79)

Wie Paul Forman in seiner Studie zeigt, wurde Spenglers Wissenschafts- und Rationalitätskritik in den frühen 20er Jahren breit rezipiert, häufig mit positiver Resonanz, manchmal auch von jenen, die ihres »mechanisierenden Denkens« wegen besonders angegriffen wurden – den Physikern und Mathematikern (Spengler 1923: 154).[23] Spengler schien die Gefühlslage seiner Zeit in Worte zu fassen und ihr einen 'Sinn' zu geben: Der Schock des Zusammenbruches der alten Welt, die Angst vor der »starren Maschinenhaftigkeit« des Daseins, das Gefühl von Desorientierung angesichts von Veränderungen, die man nicht zu deuten vermochte, und das Gefühl von Sinnlosigkeit in einer Zeit, in der alle Regeln außer Kraft gesetzt schienen und nirgends ein klares Ziel mehr auszumachen war. Was man zunächst nur als blindes Chaos empfand, mochte einem nach der Lektüre von Spenglers Buch vielleicht als historische Notwendigkeit erscheinen.

Die anti-modernistische Strömung, die in Spengler ihren berühmtesten Sprecher hatte, fand im Intuitionismus Brouwers ihren mathematischen Ausdruck. Ähnlich wie Spengler den mechanischen Charakter der Naturwissenschaft kritisierte und deren Entfremdung von den Fragen des Lebens, warfen die Anhänger Brouwers dem Hilbertschen Formalismus

---

23 Die unglaubliche Resonanz, die Spenglers Modernisierungs- und Wissenschaftskritik fand, und die Auswirkungen, die daraus für die Mathematik zu befürchten waren, wurden von vielen Mathematiker aber auch mit Sorge betrachtet. Im *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* jedenfalls werden die damaligen Bestrebungen, den Mathematikunterricht an den Schulen abzubauen, direkt mit Spengler in Verbindung gebracht. Diese Bestrebungen fänden, so ist im *Jahresbericht* von 1921 nachzulesen, einen »wohlvorbereiteten Boden in der feindseligen Stimmung, die gewisse weitverbreitete Werke der schönen Literatur trotz der Schwäche ihrer Gründe gegen die Mathematik zu erzeugen gewußt haben« (Jahresbericht 1921: 29). Der im selben Jahr in Göttingen gegründete *Reichsverband Deutscher Mathematischer Gesellschaften und Vereine* hatte ganz explizit zum Ziel, diese »schwere Gefahr« abzuwehren.

Künstlichkeit und »Blutleere« vor. Daß der Streit zwischen Hilbert und Brouwer kein ausschließlich intellektueller war, sondern auch eine politisch-moralische Dimension hatte, belegen die zeitgenössischen Kommentare.[24] In einer Analogie, die fatal an Spengler erinnert, verweist Weyl 1925 die formalistische Mathematik in den Bereich des Morbiden: »Doch vielleicht hat den Leser längst ein beklemmendes Gefühl beschlichen«, fragt er am Schluß seines Überblicks über den Formalismus, »gleich dem Lebenden, den ein Zauber ins Reich der Schatten versetzte. Wo sind wir denn? Ist es nicht nur ein blutleeres, jeden Gehaltes beraubtes Gespenst der alten Analysis, was hier von neuem umgeht? Ohne Zweifel: Soll die Mathematik eine ernsthafte Kulturangelegenheit bleiben, so muß sich mit dem Hilbertschen Formelspiel irgendein Sinn verknüpfen.« (Weyl 1925: 540)

Für Paul Forman steht hinter dem Erfolg, den der Brouwersche Intuitionismus in dieser Zeit hatte, eine ideologische Anpassung auch der Mathematiker an den damaligen 'Zeitgeist'. Gibt es Zeichen, so Forman, »that German physicists and mathematicians were anxious to, and deliberately tried to, alter the character of their disciplines as cognitive enterprises and to alter specific concepts employed within them in order to bring their sciences in closer conformity with the values of the Weimar intellectual milieu? I strongly suspect that the intuitionist movement in mathematics, which won so many adherents and created so much furor in Germany in this period, was primarily an expression of just such inclinations and aims.« (Forman 1971: 7) Die Resonanz, die Brouwers intuitionistische Mathematik damals fand, verdankt sich meiner Ansicht nach jedoch nicht bloß opportunistischen Gründen. Denn in einer Zeit, die sich selbst als entwurzelte verstand, mag es nicht weiter erstaunen, daß Brouwer mit seiner Forderung nach Verwurzelung der Mathematik auf ein breites Echo stieß. Mit seiner Kritik an der 'Sinn-losigkeit' des mathematischen Formalismus hat Brouwer das Gefühl von Unsicherheit, von dem auch die Mathematiker nicht ausgenommen waren, angesprochen und mit seiner Forderung nach Verankerung der Mathematik gleichzeitig Abhilfe in Aussicht gestellt. Auch Hilbert schien sich der Stimmung der Zeit nicht ganz entziehen zu können. Daß auch er in diesen Jahren mit sehr viel größerem Nachdruck als je zuvor auf dem Gewißheitscharakter der Mathematik pochte und in erheblich beunruhigterem Ton über die

---

24 Vgl. zu diesem 'moralischen' Aspekt der Grundlagendebatte auch Lorenzen 1968b, allerdings aus einer etwas anderen Perspektive.

Antinomien schrieb, die ihn zwanzig Jahre zuvor noch nicht in solche Aufregung versetzt hatten, hat letztlich die gleichen Gründe wie der Erfolg, den Brouwers 'sinnstiftende' Mathematik zu dieser Zeit besaß.

Die Unsicherheit, was die Festigkeit des mathematischen Fundaments betraf, dauerte allerdings nicht lange. Parallel zur sozialen und politischen Stabilisierung gewannen auch die Mathematiker ihr Vertrauen in die mathematischen Grundlagen zurück. Die Antinomien, obwohl keineswegs ein für allemal gebannt, hörten auf, eine Bedrohung zu sein, und auch um den Intuitionismus wurde es allmählich wieder ruhiger. Bis 1926 war Laren, der Wohnort Brouwers, ein internationaler Treffpunkt der Mathematiker gewesen. Ende 1927 war Göttingen wieder zum unbestrittenen Weltzentrum der Mathematik geworden, und Hilbert war ihr unangefochtener 'leader'. »By the end of 1927«, stellt Walter van Stigt in seiner Brouwer-Studie fest, »Brouwer's fortunes seemed to be at their lowest ebb. His programme of re-constructing mathematics had run around. His dreams of a Mathematics Institute in Amsterdam, the recognized centre of the mathematical world, were shattered. Almost all international support had fallen away.« (Van Stigt 1990: 100)

Der 'Streit um die Annalen' im Herbst 1928, von Einstein ironisch als 'Frosch-Mäuse-Krieg' bezeichnet[25], setzte dann den endgültigen Schlußpunkt (vgl. van Dalen 1990). Brouwer war 1914 in das Beratergremium der *Mathematischen Annalen* aufgenommen worden. 1928 lancierte Hilbert eine – reichlich intrigante – Kampagne, um Brouwer aus seiner Funktion zu entfernen. Mit Erfolg. Die Herausgeberschaft wurde umgewandelt und das Beratungsgremium suspendiert. Hilbert verblieb zum Schluß als einziger Herausgeber. Mit Ausnahme von Albert Einstein, der zusammen mit David Hilbert, Otto Blumenthal und Constantin Carathéodory zu den ehemaligen Herausgebern gehörte, unterstützten praktisch alle involvierten Mathematiker Hilberts Kampagne gegen Brouwer, manchmal vielleicht weniger aus innerer Überzeugung denn aus Loyalität. Zwei Vorträge, die Brouwer 1928 in Wien hielt, blieben für viele Jahre seine letzten öffentlichen Auftritte in Sachen Intuitionismus. »For all practical purposes«, so Dirk van Dalen, »1928 marks the end of the *Grundlagenstreit.*« (Van Dalen 1990: 31)

Ende der 20er Jahre schien die Grundlagenkrise beigelegt. Der Hilbertsche Formalismus hatte sich durchgesetzt, ohne daß er seine Überlegenheit auch praktisch bewiesen hätte. Die Grundlagendebatte wurde

25 In Allusion an eine ursprünglich Homer zugeschriebene Parodie der *Ilias*.

beigelegt, bevor sich eines der Programme nachweislich als das 'Bessere' erwiesen hatte. Bereits 1928 stellt Hermann Weyl in einem Vortrag fest, daß sich die Hilbertsche Auffassung der Mathematik »allem Anschein nach (...) gegenüber dem Intuitionismus« durchsetze (Weyl 1928: 149). Und wenn Hilbert im selben Jahr auf dem Internationalen Mathematiker-Kongreß in Bologna die Krise schildert, die durch die Antinomien ausgelöst worden war, dann macht es den Anschein, als spreche er von etwas bereits Überwundenem: »So kam es, daß unsere geliebte Wissenschaft – was die Frage nach ihrem innersten arithmetischen Wesen und Grunde betrifft – zwei Jahrzehnte hindurch wie von einem bösen Traum heimgesucht wurde. Ich begrüße es als ein Erwachen, als ein leuchtendes Morgenrot, wenn in der letzten Zeit eine Reihe jüngerer Mathematiker wieder auf Zermelos Gedanken zurückgehen.« (Hilbert 1930b: 10)[26] Was die zeitliche Datierung betrifft, so ist meiner Sicht zufolge Hilberts Rückblick nicht ganz stimmig. Der »böse Traum« dauerte nicht zwei Jahrzehnte, sondern beschränkte sich auf einige Jahre. Wesentlicher scheint mir jedoch zu sein, daß Hilbert in diesem Passus den Umgang mit den Antinomien implizit als ein subjektives Problem deutet. Es gibt keinen objektiven, keinen innermathematischen Grund dafür, weshalb man »Zermelos Bahnen« irgendwann einmal hätte verlassen und weshalb man umgekehrt wieder in sie hätte einschwenken sollen, wie er es für die Gegenwart konstatiert.

Als Hilbert in Bologna seinen Vortrag hielt, hatte sich die formalistische Auffassung der Mathematik als handlungsleitendes Modell zu einem großen Teil bereits durchgesetzt. Daran konnten auch die verschiedenen limitativen Beweise nichts ändern, die einige Jahre später Schlag auf Schlag vorführten, daß das Hilbertprogramm nicht realisierbar war, angefangen mit dem Unvollständigkeits- und Widerspruchsfreiheitsbeweis von Kurt Gödel im Jahr 1931 bis hin zu Turings Unentscheidbarkeitsbeweis fünf Jahre später (vgl. Kap. 2). Die 'moderne' Mathematik hatte sich als Arbeitsprogramm durchgesetzt, und der Intuitionismus ist für die Nachgeborenen bloß noch eine kurze Episode in der Geschichte der Mathematik und ihrer Krisen. Nur wenige Jahre nach Hilberts Vortrag in Bologna scheint die Kontroverse zwischen Hilbert und Brouwer bereits entfernte Vergangenheit zu sein: »Lebhaft«, so schreibt rückblickend Arend Heyting, ein Schüler Brouwers, »steht in der Erinnerung

26 Mit den 'jüngeren Mathematikern' waren vor allem Abraham Fraenkel, Thoralf Skolem und John von Neumann gemeint, die je einzeln Zermelos mengentheoretisches Axiomensystem weiter ausgebaut haben.

der Streit zwischen Hilbert und Brouwer. Beide hochverdient für die Mathematik, beide von einer großen Liebe zur ihrer Wissenschaft beseelt, wurden diese Männer durch die Divergenz ihrer Grundansichten zu erbitterten Gegnern. Wie Brouwer es nicht ertragen konnte, daß die Mathematik, dieses kostbare Kleinod des Geistes, zu einem sinnlosen Spiel mit Zeichen werden sollte, so war es für Hilbert unmöglich, die schönsten Teile des stolzen Bauwerkes, das für ihn die Mathematik war, einer spitzfindigen Tadelsucht zu opfern.« (Heyting 1934: 53f.) Die Diskussion von Grundlagenfragen wurde zu einer Spezialdisziplin, vom praktischen Betrieb der Mathematik weitgehend abgekoppelt. Von nun an beherrschte ein »pragmatischer Formalismus« (Thiel 1972: 128) das Feld, der gekennzeichnet war durch ein allgemeines Desinteresse des mathematischen Normalarbeiters an Begründungsfragen. Als Hans Hahn 1934 – mit Blick auf Hilberts Forderung nach einem absoluten Widerspruchsfreiheitsbeweis – schrieb: »Es zeigt sich nur eben auch hier wie überall, daß die Forderung nach einem absolut gesicherten Wissen eine überspannte Forderung ist – es gibt auf gar keinem Gebiet ein absolut gesichertes Wissen!« (Hahn 1934: 131), sprach er damit eine Mehrheitsmeinung aus, wie sie von nun an die Haltung der meisten Mathematiker und Mathematikerinnen charakterisierte.

# Teil 3
# Reale Maschinen

# Übersicht

> It would be quite unfair to expect a machine straight from the factory to compete on equal terms with an university graduate.
>
> *Alan M. Turing*[1]

Solange die 'Maschine', die Alan Turing 1936 in seinem Aufsatz beschrieben hatte, nur auf dem Papier existierte, hatten seine Überlegungen keine praktischen Folgen. Sie waren nur einem kleinen Kreis von Mathematikern bekannt und wurden ausschließlich im Rahmen der mathematischen Grundlagendebatte diskutiert. Das änderte sich, als in den 40er Jahren der 'wirkliche' Computer erfunden wurde. Seine Erfindung hat Turings Überlegungen eine konkrete Gestalt verliehen. Der Computer wurde zu einer Art »Existenzbeweis« für Turings Mechanisierungsthese (Pylyshyn 1986: 75). Oder wie es Herbert A. Simon rückblickend formulierte: »Computers have transported symbol systems from the platonic heaven of ideas to the empirical world of actual processes carried out by machines or brains, or by the two of them together.« (Simon 1988: 28) Es gab nun eine Maschine, die tatsächlich, und nicht nur auf dem Papier, Leistungen erbrachte, die man bis anhin als genuin menschlich betrachtet hatte – eine Maschine, die intelligentes Verhalten zu zeigen schien.

Die Idee, zwischen Computer und Mensch eine Verbindung herzustellen, lag zunächst nicht unbedingt auf der Hand. Bevor man zwischen dem Menschen »aus Fleisch und Blut« und der Maschine aus »Glas und Metall« (Simon) eine Ähnlichkeit sehen konnte, war eine neue Deutung des Computers erforderlich, die abrückte von seiner ursprünglichen Definition als gigantische Rechenmaschine und dafür anknüpfte an die Überlegungen, die Alan Turing in seiner Arbeit entwickelt hatte.

Den Anfang machte John von Neumann 1945 mit seinem berühmten *First Draft of a Report on the EDVAC*, in dem er eine Beziehung herstellte zwischen der funktionalen Organisation des menschlichen Gehirns und der logischen Struktur eines Digitalcomputers (von Neumann 1945). Von Neumann bezog sich dabei auf eine Arbeit von Warren McCulloch und Walter Pitts, die zwei Jahre früher erschienen war (McCulloch/Pitts

---

1 Turing 1948: 14.

1943). In dieser Arbeit haben McCulloch und Pitts zwei folgenreiche Überlegungen formuliert: Sie legten zunächst einmal dar, daß man das Verhalten eines neuronalen Systems in Termini der Aussagenlogik beschreiben kann, und zeigten dann anschließend, daß jeder Algorithmus im Prinzip durch ein solches neuronales Modell (ein McCulloch-Pitts-Netz) realisiert werden kann. Dieser Nachweis hatte eine gewichtige Implikation. Denn damit war demonstriert, daß zwischen einem solchen neuronalen Netz und Turings 'Maschine' eine funktionale Äquivalenz besteht. »Thanks to their demonstration«, so Howard Gardner in seiner Geschichte der Cognitive Science, »the notion of a Turing machine now looked in two directions – toward a nervous system, composed of innumerable all-or-none neurons; and toward a computer that could realize any process that can be unambiguously described. Turing had demonstrated the possibility in principle of computing machines of great power, while McCulloch and Pitts had demonstrated that at least one redoutable machine - the human brain - could be thought of as operating via the principles of logic and, thus, as a powerful computer.« (Gardner 1985: 18f.)

Zu dieser Zeit war die Parallele, die man zog, noch auf der Ebene der 'hardware' angesiedelt. Das änderte sich in den 50er Jahren. Der Vergleich, den man nun anstellte, bezog sich nicht mehr auf das menschliche Gehirn und die Schaltkreise des Computers, sondern auf die Ebene der Software. »When I first began to sense that one could look at a computer as a device for processing information, not just numbers«, so Herbert A. Simon rückblickend, »then the metaphor I'd been using, of a mind as something that took some premises and ground them up and processed them into conclusions, began to transform itself into a notion that a mind was something which took some program inputs and data and had some processes which operated on the data and produced output. There's quite a direct bridge, in some respects a very simple bridge, between the earlier view of the mind as a logic machine, and the later view of it as a computer.« (Zit. in McCorduck 1979: 127)

Herbert Simons Rückblick macht deutlich, wie früh und in welchem Ausmaß auch sich der Computer (bzw. die Deutung, die man ihm gab), dem Denken aufprägte. J. David Bolter spricht in diesem Zusammenhang von 'defining technologies' (Bolter 1986). Als 'defining technologies' bezeichnet Bolter jene Technologien – die Uhr, die Dampfmaschine und heute der Computer –, die die Art und Weise, wie die Welt gedeutet wird, maßgeblich beeinflussen. 'Defining technologies' – paradigmatische Technologien – sind wie Brillen: sie verändern unseren Blick auf die Welt. Eine paradigmatische Technologie ist, so Bolter, »always available to serve as a metaphor, example, model, or symbol. A defining technology resembles a magnifying glass, which collects and focuses seemingly disparate ideas in a culture into one bright, sometimes piercing ray. Technology does not call forth mayor cultural changes by itself, but it does bring ideas into a new focus by explaining or exemplifying them in new ways to larger audiences.« (Bolter 1986: 11)

Mit der Erfindung des Computers haben Turings Überlegungen praktische Gestalt angenommen. Nachdem in Teil 1 und Teil 2 die *theoretische* Idee des Computers im Mittelpunkt gestanden hat, geht es nun in diesem dritten und letzten Teil um den *realen* Computer. Das gleich anschliessende Kapitel beschäftigt sich mit der Geschichte seiner Erfindung. Wie vollzog sich die praktische Entwicklung des Computers und inwieweit war sie beeinflußt von Turings theoretischen Überlegungen? Weshalb wurde der Computer in den 40er Jahren erfunden – und nicht zu einem späteren Zeitpunkt (oder einem früheren)? Als was hat man ihn in den ersten Jahren wahrgenommen und wie verlief seine kulturelle Assimilation? Das sind Fragen, denen ich in Kapitel 6 nachgehen werde.

Turings Arbeit hat Implikationen auch für die Soziologie, vor allem auch für eine Soziologie der Mensch/Maschine-Differenz. Mit seiner Arbeit hat Turing ein begriffliches Instrumentarium bereitgestellt, das sich meiner Ansicht nach nutzbar machen läßt für eine neue und präzisere Bestimmung der Differenz zwischen regelbestimmtem und sinnhaftem Handeln. Dies werde ich in den beiden letzten Kapitel anhand von zwei Beispielen etwas näher erläutern. In Kapitel 7 versuche ich zu zeigen, daß Turings 'algorithmischer' Maschinenbegriff einige Klarheit bringen könnte in die mitunter etwas verwirrliche techniksoziologische Diskussion. Mit seiner konzeptuellen Entkoppelung von Algorithmus und gerätetechnischer Apparatur hat Turing eine theoretische Grundlage bereitgestellt, die meiner Ansicht nach nutzbar gemacht werden kann für die Entwicklung eines soziologischen Maschinenbegriffs. Im anschließenden Kapitel 8 geht es um die Entwicklung einer soziologischen Perspektive auf das Projekt der Künstlichen Intelligenz. Ähnlich wie in Kapitel 7 soll auch hier gezeigt werden, daß sich auf der Basis von Turings Überlegungen die Diskussion rund um die Künstliche Intelligenz argumentativ um einiges vereinfachen ließe. Turings Arbeit bereitet gewissermaßen das Terrain vor, von dem aus man zu einer soziologischen Bestimmung dessen gelangen kann, was Maschinen können und wozu sie niemals in der Lage sein werden.

Kapitel 6

# Erfindung als Prozeß

## *Die technische und kulturelle Konstruktion des Computers*

Ein Rechenautomat zieht die aus einer gewöhnlichen Büro-Rechenmaschine und der sie bedienenden menschlichen Rechnerin bestehende Zweiheit zu einer Einheit zusammen.

*Alwin Walther*[1]

Die Maschine, die Alan Turing in seinem Aufsatz beschrieben hatte, war keine Maschine im klassisch-physikalischen Sinne, sondern eine 'Papiermaschine' – ein mathematisches Modell, das Turing einführte, um den Begriff des Algorithmus zu präzisieren (vgl. Kap. 2). Turing war kein technischer Bastler, sondern ein abstrakt denkender Mathematiker. Seine Argumentation war rein theoretisch und völlig unabhängig von der konkreten Beschaffenheit der Maschine, die er in seinem Aufsatz beschrieb. Wie Turings Maschinendesign technisch realisiert ist, ob z.B. das Speicherelement aus einem Papierstreifen besteht, aus Vakuumröhren oder aus einem Magnetband, tangiert die Gültigkeit seiner Überlegungen nicht. Turings These, daß jeder algorithmische Prozeß von einer Maschine ausgeführt werden kann, die nur über einige wenige Grundoperationen verfügt: Einlesen von Zeichen, Zeichen löschen bzw. überschreiben, Bewegung nach rechts, Bewegung nach links, Anhalten, gilt immer, unabhängig davon, wie diese Maschine gerätetechnisch realisiert ist, d.h. aus welchen Materialien sie besteht und wie diese zusammengefügt sind. Entsprechend kann eine Turingmaschine auch auf unterschiedlichste Weise praktisch verwirklicht sein. Eine mögliche Variante ist der moderne Digitalcomputer.[2]

---

1 Walther 1956: 13.

2 Genau genommen sind drei verschiedene Abstraktionsstufen zu unterscheiden: Die Ebene (1) der Maschinentafel, (2) der Turingmaschine, so wie sie Turing in seinem Aufsatz beschreibt, und schließlich (3) die gerätetechnische Ebene der konkreten Apparatur. Turing hat in seinem Aufsatz das Funktionsprinzip einer einfachen 'Maschine' beschrieben, die nur über einige wenige Grundoperationen verfügt (2), ohne dabei irgendwelche Aussagen zu machen über ihre gerätetechnische Realisierung (3). Gleichzeitig hat er gezeigt, daß sich das Verhalten einer solchen Maschine vollständig in Form einer zweidimensionalen Matrix, einer sog. 'Maschinentafel' darstellen läßt (1). So gesehen *ist* die Maschinentafel die Turingmaschine. Die Maschine selbst, so wie sie Turing in seinem Aufsatz beschreibt, hat bloß veran-

1936, als Turing seinen Aufsatz schrieb, gab es jedoch noch keine Computer, und er hat auch nicht an wirkliche Maschinen gedacht, als er seine 'Papiermaschine' konzipierte. Dennoch hat Turing mit seinem Maschinenmodell das Grunddesign des modernen Digitalcomputers vorweggenommen:

(1) Turings Maschine operiert diskret, Schritt für Schritt, nicht kontinuierlich. Das ist mit *Digitalität* gemeint.[3]

(2) Sie geht *automatisch* vor, d.h. ohne menschliche Intervention.

(3) In ihrem Vorgehen folgt sie einer Folge von Befehlen, einem *Programm*, wie man heute sagen würde.[4]

(4) Von ihrem Funktionsbereich her gesehen ist sie *universell*, d.h. nicht auf eine bestimmte Aufgabe beschränkt. Es ist das Programm, das aus der universellen Maschine eine funktional spezifizierte macht.

(5) Die Operationselemente sind bedeutungsfreie Zeichen, *Symbole*, und nicht Zahlen.

Mit diesen fünf Grundprinzipien hat Turing das Minimaldesign des modernen Digitalcomputers beschrieben. Alle Digitalcomputer, die seit den 40er Jahren entwickelt wurden, sind gleichermaßen gerätetechnische Realisierungen von Turings Maschine. Denn trotz enormer Unterschiede, was ihre Bausteine und ihre Architektur anbelangt, haben sie einige Grundprinzipien gemeinsam, und es sind diese Grundprinzipien, die Turing als erster beschrieben hat.

Was von einer Turingmaschine ausgeführt werden kann, läßt sich – mit gewissen Einschränkungen – auch von einem Computer berechnen.[5]

---

schaulichende Funktion. Sie führt konkret vor, was es heißt, einem Algorithmus zu folgen.

3 Im Unterschied zu Analogmaschinen, bei denen die Werte durch physikalische Größen, z.B. Längen von Strecken oder elektrische Spannungen, dargestellt werden. Ein Rechenschieber ist ein einfaches Beispiel eines Analogrechners.

4 Die Anweisungen können eingebaut sein (Zustandsvariante) oder in Form von schriftlichen Instruktionen vorliegen (Instruktionsvariante). Turing hat in seinem Aufsatz beide Varianten unterschieden (vgl. S. 91). Beide Modellierungen sind jedoch funktional äquivalent, und sie sind auch komplementär. Was als Hardware realisiert ist, kann – bis zu einer gewissen Grenze – auch programmiert werden und umgekehrt. Das war auch die Überlegung, die Turing bei der Entwicklung seiner eigenen Maschine, der *Automatic Computing Engine* (ACE), leitete. Anstatt sich auf die Hardware-Ausstattung zu konzentrieren, verlegte er das Gewicht auf die Programmebene. »We are trying to make greater use of the facilities available in the machine to do all kinds of different things simply by programming rather than by the addition of extra apparatus«, führte er 1947 an einer Computertagung in Harvard aus, in durchaus gewollter Abgrenzung zur Strategie, die er in den USA eingeschlagen glaubte (zit. in Aspray 1985a: 272f.).

Und umgekehrt ist das Konzept der Turingmaschine eine mathematische, von der technischen Ausführung abstrahierende Modellierung des Funktionsprinzips und Funktionsbereichs von Digitalcomputern. Die universelle Turingmaschine ist, so William Aspray zusammenfassend, »a theoretical model of a digital, stored-program computer. Instructions programming the operation of the machine, as well as data, are entered on the tape. The tape serves the dual function of input-output medium and memory – similar to magnetic tapes in computers (...) Information is stored, processed, and transferred digitally. Central processing takes place at the read-write mechanism, which is able to carry out logical and arithmetic operations on the scanned cell and those adjacent to it – whether they represent instructions, input data, or intermediate results. Many programming features, like conditional and unconditional branching and recursive loops, have their Turing machine equivalents.« (Aspray 1990c: 118f.) Als man in den späten 30er Jahren an der Entwicklung des modernen Digitalcomputers zu arbeiten begann, wurde dieser Zusammenhang jedoch noch kaum wahrgenommen. Die technische (und kulturelle) Konstruktion des Computers blieb lange Zeit unbeeinflußt von den theoretischen Überlegungen, wie sie Alan Turing im Rahmen der mathematischen Berechenbarkeitsdiskussion in den 30er Jahren entwickelt hatte. Die praktische Entwicklung des Computers vollzog sich über weite Strecken unabhängig von seiner theoretischen Erfindung.

## 1. Maschinenvarianten
### *Die technische Erfindung des Computers*

> Entscheidender Gedanke 19. Juni 1937.
> Erkenntnis, daß es Elementaroperationen gibt, in die sich sämtliche Rechen- und Denkoperationen auflösen lassen.
>
> *Konrad Zuse, Tagebuch*[6]

Der moderne Digitalcomputer wurde in den frühen 40er Jahren erfunden, und zwar gleichzeitig in mehreren Varianten. Heute gilt der Z3 von Konrad Zuse, der 1941 in Berlin zum ersten Mal in Betrieb gesetzt wurde, als erster programmgesteuerter Digitalcomputer. Zuse war allerdings

5 Die Einschränkungen beziehen sich vor allem auf die Speicherkapazität. Im Gegensatz zur Turingmaschine, die mit ihrem unendlichen Band über eine unbeschränkte Speicherkapazität verfügt, ist das Gedächtnis der irdischen Computer endlich.

6 Zuse 1984: 41.

nicht der einzige, der in dieser Zeit an der Entwicklung eines Digitalcomputers arbeitete. Zwischen 1943 und 1946 wurden unabhängig voneinander vier weitere Prototypen fertiggestellt, drei amerikanische und ein britischer. 1944 stellte Howard Aiken, Physikprofessor an der Harvard Universität, seinen Mark I der Öffentlichkeit vor, an dessen Entwicklung er seit 1937 gearbeitet hatte[7]. Lange Zeit galt der Mark I als erster funktionsfähiger Digitalcomputer. Tatsächlich aber arbeitete Konrad Zuse damals bereits schon an seinem zweiten Computer, dem berühmten Z4. Es dauerte allerdings zwei Jahrzehnte, bis man, wie Zuse in seiner Autobiographie etwas ungehalten schreibt, in der Öffentlichkeit zur Kenntnis nahm, daß der Computer nicht eine ausschließlich amerikanische Angelegenheit war. Auch die Fachwelt habe hartnäckig an der »Legende« festgehalten, daß der Computer eine rein »amerikanische Erfindung« sei. »Erst nach und nach sollte sich die Wahrheit durchsetzen.« (Zuse 1984: 96)

In England wurde Ende 1943 der Colossus installiert, ein elektronischer Computer, der unter der Ägide des englischen Geheimdienstes als Dechiffriermaschine entwickelt worden war und an dessen Konzeption auch Turing mitgearbeitet hatte.[8] Das zweite amerikanische Projekt neben dem Mark I war ein Relais-Computer, der unter der Leitung von George Stibitz in den Bell Laboratories entwickelt worden war. 1946 wurde Stibitz' Model V zum ersten Mal der Öffentlichkeit vorgestellt. Einige Monate zuvor hatten Presper J. Eckert und John W. Mauchly an der Moore School den ENIAC fertiggestellt. Der ENIAC war der erste funktionsfähige elektronische Digitalcomputer, und er übertraf alle anderen, was Größe und Leistungsfähigkeit anbetraf. Der ENIAC beanspruchte Raum von der Größe eines Saales, enthielt 1500 elektromechanische Relais und 17 000 Vakuumröhren, er war fünfhundertmal schneller als

7 Zur Frühgeschichte des Computers gibt es eine zwar umfangreiche, aber, wie in der Computergeschichte leider üblich, meist vorwiegend technisch orientierte Literatur, die überdies streckenweise stark vom Frontier-Geist der ehemaligen Computerpioniere geprägt ist; vgl. zum folgenden v.a. Aspray 1990a; Aspray 1990b; Ceruzzi 1983; Petzold 1985; Ramunni 1989; Randell 1982a.

8 Vgl. zum Colossus Randell 1982b; Ceruzzi 1990b: 232ff.; und zum Beitrag Turings an der Entwicklung des Colossus vgl. Hodges 1989: 307ff. Der Colossus war allerdings genau genommen kein universeller, sondern ein 'special-purpose'-Computer (vgl. Anmerkung 16, S. 217). Deshalb (und weil er bis 1975 unter Geheimhaltung stand), wird er in der einschlägigen Literatur meistens nur am Rande erwähnt.

die elektromechanischen Varianten zu dieser Zeit und ersetzte mit seiner Leistung die Arbeit von 75 000 menschlichen 'computern'.[9]

Alle Computermodelle, die in dieser Zeit entwickelt worden sind, haben entscheidende Merkmale gemeinsam, und es sind diese Merkmale, die Turing als erster beschrieben hat. In ihrer praktischen Ausführung unterschieden sie sich jedoch beträchtlich. Der Mark I, das Model V und Zuses Z3 und Z4 waren elektromechanische, der ENIAC und die englischen Colossi elektronische Computer. Bei einigen Modellen, dazu gehörten der Mark I, das Model V und Zuses Computer, wurden die Befehle sequentiell ausgeführt, der ENIAC hingegen hatte eine Parallelarchitektur. Einige Computer beruhten auf dem Binärsystem (Model V, Z3 und Z4, Colossi), andere auf dem dezimalen (Mark I, ENIAC).[10] Praktisch alle Kombinationen kamen vor, und es war zu dieser Zeit noch keineswegs ausgemacht, welches Prinzip das beste war.

Anfang der 50er Jahre war der Selektionsprozeß dann abgeschlossen. 'Computer' hieß nun: digital (und nicht analog), binär (und nicht dezimal), elektronisch (und nicht elektromechanisch), sequentielle Befehlsverarbeitung (und nicht parallele), intern zusammen mit den Daten gespeichertes Programm (und nicht externe Programmierung). Damit hatte sich eine Variante durchgesetzt, die sog. *Von-Neumann-Architektur*, die es zwar in dieser Kombination in der Frühphase noch nicht gegeben hatte, deren Ausgangspunkt jedoch der ENIAC gewesen war. Die anderen Computermodelle gerieten in Vergessenheit, während John von Neumanns Design zu einem technologischen Paradigma avancierte, zu einem handlungsleitenden Modell, an dem sich die Computerentwicklung von nun an orientierte – mitunter allerdings auch in durchaus negativer Absicht. In Frankreich z.B. lautete der Auftrag, einen Computer zu entwickeln, der sich von der »conception americaine« deutlich unterschied. Das Planungskonzept war entsprechend einfach: »Il ne s'agissait pas uniquement de se distinguer mais de prendre volontairement la direction opposée de ce qui se faisait ailleurs.» (Ramunni 1989: 105) Der Erfolg dieser Strategie war allerdings gering. Die »conception française», so wie sie unter Louis Couffignal geplant worden war, erwies sich im Endeffekt als undurchführbar.

9 Vgl. zum ENIAC u.a. Burks/Burks 1981; Ceruzzi 1983, insb. Kap. 5; Hughes 1975. 'ENIAC' war das Akronym für *Electronic Numerical Integrator and Automatic Calculator*.

10 Zu diesem Vergleich vgl. die Zusammenstellung in Burks/Burks 1981: 382f.

Mit der Durchsetzung der Von-Neumann-Architektur setzte ein, was Thomas Kuhn für die Wissenschaft als 'Normalphase' bezeichnet. Erst seit den späten 70er Jahren werden Computerarchitekturen entwickelt, die einen qualitativen Bruch mit der Von-Neumann-Architektur markieren. Es sind Computer, die parallel operieren (anstatt seriell), die dezentrale Speicher haben (anstatt einen globalen) und bei denen die Koordination über einen gemeinsamen Informationsaustausch geschieht (und nicht mehr über eine zentrale Kontrollinstanz). Damit werden Entwicklungslinien wieder aufgegriffen, die Anfang der 50er Jahre abgebrochen worden waren.[11]

In vielen Darstellungen zur Geschichte des Computers wird die Erfindung des Digitalcomputers mit dem 2. Weltkrieg in Verbindung gebracht. Mit dem Ausbruch des Krieges habe, so eine verbreitete Interpretation, die Nachfrage nach Rechenleistung enorm zugenommen – die Entwicklung des Digitalcomputers war die Antwort darauf. »The war«, so etwa William Aspray in seiner Studie über John von Neumanns Beitrag zur Entwicklung des Computers, »provided an incentive to improve computational equipment, since it was useful in the preparation of ballistic tables, aircraft and atomic weapons design, fire control, and logistics, and the U.S. government felt compelled to allocate substantial resources to these problems.« (Aspray 1990a: 25) Ohne staatliche Gelder hätten diese kostspieligen Computerprojekte niemals durchgeführt werden können, und auch von seinem Design her war der Computer auf die Problemstellungen des Militärs zugeschnitten – auf ballistische Berechnungen im Falle des ENIAC, auf die Dechiffrierung der deutschen *Enigma* bei den englischen Colossi. Diese Deutung der Entwicklungsvoraussetzungen des Computers trifft zwar für die beiden elektronischen Computer zu, für den Colossus und für den ENIAC, nicht aber – oder nur sehr beschränkt – für die anderen Varianten. Sie alle wurden vor Ausbruch des Krieges konzipiert, aufgrund privater Initiative und mit Blick auf einen Einsatz im Bereich des wissenschaftlichen und technischen Rechnens.

Konrad Zuse hat seinen Computer mit dem Ziel gebaut, die aufwendige Rechenarbeit in der Flugzeugindustrie, die zu dieser Zeit noch von menschlichen 'computern' geleistet wurde, zu mechanisieren. Er habe nicht akzeptieren wollen, schreibt Zuse in seiner Autobiographie, »daß lebende, schöpferische Menschen ihr kostbares Leben mit derart nüchter-

11 Zu den möglichen Gründen für diese Abkehr vom sequentiellen Kontrollmodell vgl. ausführlicher Heintz 1991a.

nen Rechnungen verschwenden sollten. Da mußte doch etwas getan werden (...) Kann man diese Dinge nicht rationalisieren?« (Zuse 1970: 35)[12] Zu Beginn wurde sein Projekt aus privaten Geldern finanziert, später dann mit Hilfe der *Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt*. Auch nach 1939 zeigte die Wehrmacht nur wenig Interesse an seiner Arbeit. Zuse wurde zwar vom Militärdienst freigestellt, aber als Statiker, nicht als Computerbauer (Zuse 1984: 53ff.).

Ähnlich hat auch Howard Aiken seinen Computer mit Blick auf einen Einsatz im Bereich des wissenschaftlichen Rechnens gebaut, und das gleiche gilt auch für die Computer von George Stibitz, bei denen ursprünglich geplant war, sie für die wissenschaftlich-technischen Berechnungen in den Bell Labs selbst einzusetzen. In beiden Fällen kam zunächst die Privatwirtschaft für die Finanzierung auf, die IBM im Falle von Aikens Mark I, die Bell Laboratories (bzw. der AT&T-Konzern) im Falle von Stibitz. Das Militär beteiligte sich erst später.[13] Zieht man alle damals entwickelten Computer in Betracht, so scheint die Nachfrage und die Finanzierung durch das Militär keine unabdingbare Voraussetzung für die Entwicklung des Computers gewesen zu sein. Während die elektronischen Computer ohne die massive Nachfrage und finanzielle Unterstützung von Seiten des Militärs wohl kaum gebaut worden wären, oder zumindest nicht so bald, sind die elektromechanischen Computer ursprünglich alle als zivile Projekte entwickelt worden.

Technisch gesehen wäre die Erfindung des Computer sogar schon um einiges früher möglich gewesen. Das gilt zumindest für die elektromecha-

---

12 Ähnlich wie Konrad Zuse hat auch Charles Babbage (1791 – 1871) seine Differenzmaschine dem rationalisierten numerischen Rechnen nachgebildet. Seine konkrete Vorlage waren freilich nicht Rechnerinnen in der Flugzeugindustrie, sondern die 'Rechen-Manufaktur', die Baron Gaspard de Prony zur Berechnung der bei ihm in Auftrag gegebenen Logarithmentafeln organisiert hatte. De Prony selbst war durch Adam Smiths *Wealth of Nation* inspiriert worden, wie Charles Babbage unter dem Titel *On the Division of Mental* (!) *Labour* in seiner *Economy of Manufactures and Machinery* berichtet (Babbage 1832: 315ff.).

13 Nachdem die Bell Labs Stibitz' ersten (allerdings noch nicht universellen) Rechner, den Complex Number Computer, finanziert hatten, lehnten sie das Anschlußprojekt zunächst einmal ab. Mit dem Eintritt der USA in den 2. Weltkrieg fand jedoch eine Verlagerung der Forschungsprioritäten auf militärische Projekte statt. Da diese mehr Rechenarbeit erforderten als die zivilen Forschungen, wurden Stibitz' Pläne nachträglich doch finanziert und mündeten 1946 in sein Model V; vgl. dazu ausführlicher Ceruzzi 1990a: 210. Der Einfluß des Militärs auf die Computerentwicklung hielt auch nach dem Kriege an, zumindest in den USA. Noch 1950 gab es in den USA nur einen großen Computer, den 1948 fertiggestellten Selective Sequence Electronic Calculator (SSEC) von IBM, der nicht in irgendeiner Form mit dem Militär verbunden war (Ceruzzi 1983: 150).

nischen Varianten. Ein Computer von der Art des Model V oder Aikens Mark I hätte schon 15 – 20 Jahre früher gebaut werden können, schreiben Arthur und Alice Burks in ihrem Überblick über die Entwicklungsgeschichte des ENIAC: »It was feasible to invent and build such a machine much earlier than was actually the case: in respect to materials and techniques, the time was surely suitable in the 1920s« (Burks/Burks 1981: 387), und auch Zuse vertritt die Meinung, daß die »technischen Schwierigkeiten, an denen Babbage scheiterte, bereits 1910 überwunden« gewesen seien. »Bestand also vielleicht eine gewisse Scheu, die geistigen Fähigkeiten des Menschen kritisch zu untersuchen und systematische Schritte in Richtung Intelligenzverstärkung zu tun? Man muß es fast annehmen.« (Zuse 1984: 31)

Nicht nur die technischen Voraussetzungen, auch die Nachfrage wäre an sich schon um einiges früher gegeben gewesen. In Zusammenhang mit der Elektrifizierung und der Entwicklung der Flugzeugindustrie war der Bedarf an Rechenleistung bereits in den 20er Jahren stark angewachsen. Bereits damals, und nicht erst im 2. Weltkrieg, stellte die Rechenarbeit einen Engpaß dar – einen 'reverse salient', um den Begriff von Thomas Hughes zu verwenden: »A salient is a protrusion in a geometric figure, a line of battle, or an expanding weather front. As technological systems expand, *reverse* salients develop. Reverse salients are components in the system that have fallen behind or are out of phase with the others (...) In an electrical system engineers may change the characteristics of a generator to improve its efficiency. Then another component in the system, such as a motor, may need to have its characteristics – resistance, voltage, or amperage – altered so that it will function optimally with the generator. Until that is done, the motor remains a reverse salient.« (Hughes 1987: 73)[14]

Obschon es technisch durchaus möglich gewesen wäre, lag die Antwort auf diesen Engpaß im Bereich des technisch-wissenschaftlichen Rechnens jedoch (noch) nicht in der Erfindung des Digitalcomputers. Die Nachfrage wurde statt dessen zunächst durch andere technische Innovationen abgedeckt – durch die Erfindung des Analogcomputers, die Perfektionierung von Lochkartenmaschinen und nicht zuletzt auch durch Rationalisierungsmaßnahmen bei den menschlichen 'computern'.[15] Erst Mit-

14 Zu einer Anwendung des Konzeptes des 'reverse salient' auf die Entwicklungsgeschichte des Computers vgl. Hughes 1975.

15 Darauf komme ich später noch einmal zurück. Analogcomputer wurden vor allem entwickelt zur Lösung komplexer Differentialgleichungen, mit denen man z.B. im

te der 30er Jahre scheinen alle Bedingungen zusammengekommen zu sein, die die Erfindung des Digitalcomputers möglich machten. »Someone could have built a working computer long before 1935 – Babbage almost did. The components (relays, vacuum tubes, teletypes, etc.) had all been around for quite a while«, schreibt Paul E. Ceruzzi in seinem Überblick über die Geschichte der frühen Computer. »But the burst of activity after 1935 shows that only then were social and economic conditions really favorable for the computer's invention. The demands of business, government, and science had built up to a point where it is not surprising that the idea of an automatic computer occured simultaneously to a number of inventors at that time. The Second World War was the catalyst that brought those demands together, while providing the necessary technical and (at least in America) financial support.« (Ceruzzi 1983: 149)

Je nach Kriterienkatalog, an dem man sich orientiert, sind die verschiedenen Computertypen, die Anfang der 40er Jahre entwickelt wurden, erst als Vorläufer des modernen Computers anzusehen. Ihnen allen fehlt ein Merkmal, das in den Augen vieler Computerhistoriker zu den wesentlichsten Attributen des modernen Computers gehört: die Programmspeicherung. »At the end of the war in 1945«, so resümiert etwa William Aspray diese Sicht, »no computers existed, if we mean by computer what we mean today: a general-purpose, digital, electronic, stored-program calculating system.« (Aspray 1986: 351) Mit dem ENIAC gab es zwar einen elektronischen Digitalcomputer, der, obschon man ihn für spezifische Aufgaben konstruiert hatte, im Prinzip eine universelle Maschine war[16], aber der Programmablauf wurde damals noch von außen

---

Rahmen von elektrotechnischen Simulationsmodellen das Verhalten von elektrischen Leitungsnetzen zu beschreiben suchte. Der erste vollautomatisierte Analogrechner war der *Differential Analyzer*, der 1931 von Vannevar Bush am MIT entwickelt worden war; vgl. Owens 1986.

16 Mit seinem Konzept der universellen Turingmaschine hat Alan Turing bereits 1936 definiert, was ein universeller Computer ist (vgl. S. 83). Im Gegensatz zur universellen Maschine ist eine spezielle Maschine, wie es z.B. der englische Colossus war, auf eine spezifische Aufgabe hin konstruiert. Eine Änderung im deutschen Chiffriersystem hätte z.B. die englischen Colossi von einem Augenblick zum anderen funktionslos gemacht. Bei einer universellen Maschine dagegen wäre in einem solchen Fall keine Neukonstruktion erforderlich gewesen, ein neues Programm hätte genügt. Oder wie es Turing 1948 bereits mit Blick auf die 'wirklichen' Computer formulierte: »The importance of the universal machine is clear. We do not need to have an infinity of different machines doing different jobs. A single one will suffice. The engineering problem of producing various machines for various jobs is replaced by the office work of 'programming' the universal machine to do these jobs.« (Turing 1948: 7)

über steckbare elektrische Leitungen fixiert (ähnlich wie bei der manuellen Telephonvermittlung). Die Gesamtheit der jeweiligen elektrischen Verbindungen verkörperte gewissermaßen die Struktur des zu lösenden Problems, und für jede neue Aufgabe hatte man entsprechend das System der Steckverbindungen zu ändern, eine Arbeit, die manchmal einen ganzen Tag dauern konnte.[17]

Das Konzept der Programmspeicherung wurde zum ersten Mal 1945 in dem berühmten *First Draft of a Report on the EDVAC* beschrieben (von Neumann 1945). Anstatt den Programmablauf relativ beschwerlich über Steckverbindungen festzulegen, lief die Idee der Programmspeicherung darauf hinaus, die Instruktionen *intern* zu speichern, und zwar am selben Ort wie die Daten. Damit, und das ist der entscheidende Punkt, erhalten Anweisungen im Prinzip den Status von Daten und können wie diese behandelt werden.[18] Diese Folgerung wurde allerdings im EDVAC-Report noch nicht gezogen. Erst nach und nach wurde man sich der Implikationen bewußt, die aus der Idee der gemeinsamen Speicherung von Daten und Instruktionen resultierten. Allan G. Bromley unterscheidet drei Phasen in der Entwicklung des Konzepts der Programmspeicherung: (1) Die Einsicht, daß Programme und Daten zusammen am selben Ort gespeichert werden können. (2) Die Erkenntnis, daß unter dieser Bedingung auch Anweisungen im Verlaufe einer Berechnung geändert werden können – z.B. in Abhängigkeit des Resultats des vorhergehenden Rechenschrittes. Das ist die an sich bekannte Idee des bedingten Befehls, die nun aber einfach zu verwirklichen war. (3) Die Entdeckung, daß nicht nur Daten, sondern auch Anweisungen Eingabewerte einer Berechnung sein können bzw. deren Resultat. Programme, die auf diese Weise Anweisungen in andere Anweisungen überführen – z.B. Programme, die in einer höheren Programmiersprache formuliert sind, in solche, die in

17 In der Frühphase des Computers war das Programmieren häufig noch Frauenarbeit. Dies illustrieren auch die frühen Computerphotographien, auf denen oft Frauen zu sehen sind – damals noch aus Sachgründen und noch nicht zu Werbezwecken. In den 50er Jahren verändert sich dann das Bild: Im Zuge der 'Professionalisierung' der Programmierarbeit verschwinden die Frauen aus den höheren Rängen der Informatik; vgl. dazu ausführlicher Hoffmann 1987, insb. Kap. III.

18 John W. Mauchly hat diese Überlegung 1947 folgendermaßen formuliert: »The third characteristic is that the instructions are stored in the internal memory in the same manner as are numerical quantities, and one set of instructions can be used to modify another set of instructions.« (Mauchly 1947: 394)

Maschinensprache geschrieben sind –, bezeichnet man heute als 'Compiler' (Bromley 1983).[19]

Autor des *First Draft of a Report on the EDVAC* war der bekannte (und bereits erwähnte) Mathematiker John von Neumann (1903 – 1957), der Ende 1944 als Berater zum ENIAC-Team gestoßen war. Noch während der Arbeit am ENIAC konzipierte die Gruppe eine neue Maschine, den EDVAC, auf den sich der Bericht bezog. Der EDVAC-Report hat auf die weitere Entwicklungsgeschichte des Computers einen enormen Einfluß gehabt. Denn in ihm wurde zum ersten Mal stringent definiert, was ein Digitalcomputer 'ist' (bzw. von diesem Zeitpunkt an war): »An *automatic computing system* is a (usually highly composite) device, which can carry out instructions to perform calculations of a considerable order of complexity (...) The instructions which govern this operation must be given to the device in absolutely exhaustive detail (...) Once these instructions are given to the device, it must be able to carry them out completely and without any need for further intelligent human intervention.« (Von Neumann 1945: 383)[20]

Obschon der Bericht erst viele Jahre später publiziert wurde, fand er informell rasche Verbreitung. Wer sich mit Computern beschäftigte, und das war zu dieser Zeit noch eine überschaubare Gruppe, deren Mitglieder sich praktisch alle persönlich kannten, hat den Bericht gelesen und sich

---

19 Auch die Idee der Programmspeicherung findet sich bereits in Turings Aufsatz von 1936. Auf dem Band der universellen Maschine können sowohl Daten wie Instruktionen gespeichert sein, letztere in Form der Beschreibungszahlen der speziellen Turingmaschinen, die die universelle Maschine simuliert. Turing ist damals allerdings bei diesem ersten Schritt stehengeblieben. Die universelle Turingmaschine kann die auf ihrem Band gespeicherten Anweisungen der speziellen Turingmaschinen zwar lesen, entschlüsseln und ausführen, sie kann sie aber nicht ändern. Diese Folgerung hat Turing erst beim Design des ACE gezogen, und zwar unabhängig von den Entwicklungen wie sie zu gleicher Zeit in den USA stattfanden; vgl. Hodges 1989: 374; Ceruzzi 1983: 134ff.

20 Ein entscheidendes Merkmal des EDVAC-Reports bestand darin, daß John von Neumann den Computer nicht aus einer technischen Perspektive beschrieb, sondern sehr abstrakt in Termini des Neuronenmodells von Warren McCulloch und Walter Pitts (vgl. S. 206). Damit führte von Neumann überzeugend vor, daß sich das logische Design eines Computers unabhängig von den konkret verwendeten Bausteinen beschreiben läßt – ganz ähnlich übrigens wie es auch Turing getan hatte, als er in seinem Aufsatz den Grundmechanismus der Turingmaschine beschrieb, ohne Angaben zu machen über deren mögliche gerätetechnische Realisierung. Diese theoretische Sichtweise hat allerdings nur geringe Wirkung gezeigt. Es ist immer noch die Schaltkreistechnologie, die als Kriterium für die generationenspezifische Einteilung von Digitalcomputern verwendet wird – und nicht die logische Struktur des Computers, d.h. seine Architektur, die auch von einem soziologischen Standpunkt aus sehr viel aufschlußreicher wäre.

an ihm orientiert. In seiner Autobiographie beschreibt Maurice Wilkes (er hat einige Jahre später den ersten programmgespeicherten Computer entwickelt), welchen Eindruck der Bericht damals auf ihn machte: »In it, clearly laid out, were the principles on which the development of the modern digital computer was to be based: the stored program with the same store for numbers and instructions, the serial execution of instructions, and the use of binary switching circuits for computation and control. I recognized this at once as the real thing, and from that time on never had any doubt as to the way computer development would go.« (Wilkes 1985: 108f.)

1946 trennte sich John von Neumann vom ENIAC-Team und ging zurück nach Princeton ans Institute of Advanced Study, wo er zusammen mit Arthur W. Burks, Herman H. Goldstine und Julian Bigelow den IAS-Computer entwickelte.[21] Unter der Bezeichnung 'Von-Neumann-Architektur' ist das Design dieses Computers zum Modell geworden für die nachfolgende Computerentwicklung. Die 'Von-Neumann-Architektur' zeichnet sich durch folgende Prinzipien aus: (1) Der Computer besteht aus fünf Funktionseinheiten: dem Steuerwerk, dem Rechenwerk, dem Speicher, den Eingabe- und den Ausgabegeräten. (2) Programme und Daten werden am selben Ort gespeichert. Das ist das Prinzip der Programmspeicherung. (3) Alle Daten sind binär codiert. (4) Die Befehle werden sequentiell, d.h. nacheinander ausgeführt, und nicht parallel wie dies noch beim ENIAC der Fall gewesen war und heute bei den modernen Supercomputern die Regel ist. (5) Die Maschine bearbeitet zu einem bestimmten Zeitpunkt immer nur je einen Datenwert. Heute zählt man die Von-Neumann-Architektur zur Klasse der sog. SISD-Architekturen (SISD = Single Instruction stream, Single Data stream). Rechnerarchitekturen werden üblicherweise danach klassifiziert, ob die Befehls- (= instruction) bzw. Datenverarbeitung (= data) sequentiell (= single) oder parallel (= multiple) organisiert ist. Entsprechend ergeben sich vier verschiedene Klassen von Rechnerarchitekturen, je nachdem ob die Maschine zu einem bestimmten Zeitpunkt einen oder mehrere Befehle bzw. einen oder mehrere Datenwerte bearbeitet.[22]

---

21 IAS = Institute of Advanced Study.

22 Dieses Klassifikationsschema stammt von Flynn 1972. Walter Giloi zählt z.B. die Pipeline-Rechner zur SIMD-Klasse und die modernen Multiprozessorsysteme zur Klasse der MIMD-Architekturen (Giloi 1981: 26). Die Zuordnung wird jedoch nicht immer einhellig gehandhabt.

Für die Modellfunktion, die der IAS-Computer besaß, wesentlicher als die Maschine selbst, die erst relativ spät, im Sommer 1951, fertiggestellt und 1952 offiziell eingeweiht wurde, waren die Berichte, in denen John von Neumann und seine Mitarbeiter ihre Arbeit laufend dokumentierten. In diesen Rapporten, und dies gilt insbesondere für den 1946 verfaßten ersten Bericht *Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument*, wurde beschrieben, was später unter der Bezeichnung 'Von-Neumann-Architektur' die weitere Computerentwicklung bestimmen sollte (Burks u.a. 1946). »The reports themselves«, so Paul E. Ceruzzi, »established a design philosophy for computers that has persisted to the present day (...) With some modifications the IAS design has survived as the paradigm of modern computer architectures.« (Ceruzzi 1983: 139; 140) Ähnlich wie der EDVAC-Report wurden auch die IAS-Berichte breit rezipiert. Denn im Gegensatz zu anderen Computerpionieren, allen voran Presper J. Eckert und John W. Mauchly vom ENIAC-Team, hat John von Neumann seine Arbeit als wissenschaftliche verstanden und eine entsprechend offene Publikationspolitik verfolgt. »We are hardly interested in exclusive patents«, schrieb er 1947 nach einer Sitzung, in der man die Patentprobleme rund um den ENIAC diskutiert hatte, »but rather in seeing that anything that we contributed to the subject, directly or indirectly, remains as accessible as possible to the general public.« (Zit. in Aspray 1990a: 45) Um etwaige Patentansprüche zu verhindern, trugen alle IAS-Berichte den expliziten Vermerk, daß sie von öffentlichem Interesse seien.[23]

In diesen ersten Jahren vollzog sich der Technologie-Transfer auf ähnliche Weise wie der Wissensaustausch in der Wissenschaft. Neben der Tatsache, daß in dieser frühen Phase Universitäten und Regierungen Hauptträger der Computerentwicklung waren, und nicht private Unternehmen, hat auch von Neumanns universalistische Informationspolitik wesentlich dazu beigetragen. Erst in den 50er Jahren begann sich vermehrt auch die Industrie für den Bau von Computern zu interessieren, mit negativen Folgen für den Informationsaustausch. Neben Forschungsberichten waren in diesen ersten Jahren persönliche Kontakte das Haupt-

23 Von Neumanns dezidiert universalistische Haltung war mit ein Grund für das Zerwürfnis mit Eckert und Mauchly vom ENIAC-Team. Die Ablehnung der Patente, die Eckert und Mauchly für die Entwicklung des ENIAC und EDVAC angemeldet hatten, wurde mit der weiten, wenn auch informellen Verbreitung des EDVAC-Reports begründet; vgl. dazu ausführlicher Aspray 1990a: 42ff.; Ramunni 1989: 53; 63, Williams 1985: 347ff.; 354.

medium der Wissensdiffusion, und auch in dieser Hinsicht hatte das IAS-Team eine herausragende Stellung inne.[24] Der IAS-Computer stand schon bald im Mittelpunkt der Tagungen, die man nach Beendigung des Krieges zu organisieren begann, und diese waren, wie Paul Ceruzzi schreibt, »a forum where the many different theoretical approaches to computing could be critized, and where a consensus about what computers *ought* to look like first took form.« (Ceruzzi 1983: 132)[25] Wer sich mit Computern befaßte, hat zu dieser Zeit das Institute of Advanced Study besucht und sich von John von Neumann und seinen Mitarbeitern die Konstruktionsdetails des IAS-Computers persönlich erklären lassen. Zu den Besuchern gehörten u.a. der bereits erwähnte Maurice Wilkes aus England, Louis Couffignal aus Frankreich, der mit der Entwicklung des ersten französischen Computers betraut war, und Heinz Rutishauser und Ambros P. Speiser von der ETH , wo seit 1950 Zuses Z4 installiert war und man einen eigenen Computer, den ERMETH, zu planen begann.[26]

Wie der englische Wissenschaftssoziologe H.M. Collins in einer instruktiven Studie über den Nachbau eines neuen Lasergerätes zeigt, ist im Falle von neuem, noch nicht verbreitetem Wissen persönlicher Kontakt und informelle Kommunikation eine unabdingbare Voraussetzung für den Wissenstransfer. Was Collins am Beispiel des Lasers darstellt, läßt sich meiner Ansicht nach auch auf die frühe Computerentwicklung übertragen. 1970 publizierte eine kanadische Forschungsgruppe einen Bericht, in dem sie die Konstruktion eines neuen Lasergerätes beschrieb, den sie TEA-Laser nannte. In der Folge versuchten verschiedene Physikinstitute, diesen neuen Laser nachzubauen. Erfolg war jedoch nur jenen Forschern beschieden, die zu den Laser-Experten direkten Kontakt hatten, während jenen Gruppen, die die Konstruktionsdetails bloß vom schriftlichen Bericht her kannten, der Nachbau nicht gelang. Für eine erfolgreiche Nach-Konstruktion war offensichtlich mehr Wissen erforderlich als in der Do-

---

24 Fachzeitschriften und Monographien haben damals noch eine untergeordnete Rolle gespielt. 1954 gab es erst zwei Spezialzeitschriften auf dem Markt. Vgl. dazu ausführlicher Aspray 1986.

25 Die erste Computertagung fand bereits Ende 1945 am MIT statt. 1946 organisierte die Moore School of Electrical Engineering, an der der ENIAC gebaut worden war, ihre später berühmt gewordene Sommeruniversität. Andere wichtige Tagungen wurden von der Harvard-Universität organisiert (1947 und 1949), von der IBM (1948) und von der Universität Cambridge (1949) bzw. Manchester (1951); vgl. zu den frühen Computertagungen ausführlicher die Einleitung zu Aspray 1985a.

26 Einen Überblick über den Besucherstrom am Institute of Advanced Study gibt Aspray 1990a: 88. Zur frühen Computerentwicklung in der Schweiz vgl. ausführlicher Schwartz 1981 sowie Gutknecht 1987.

kumentation enthalten war, Wissen, wie es nur in persönlichen Kontakten und direkten Gesprächen vermittelt werden konnte. Collins faßt das Resultat seiner Studie folgendermaßen zusammen: »In sum, the flow of knowledge was such that, first, it travelled only where there was personal contact with an accomplished practitioner; second, its passage was invisible so that scientists did not know whether they had the relevant expertise to build a laser until they tried it; and, third, it was so capricious that similar relationships between teacher and learner might or might not result in the transfer of knowledge. These characteristics of the flow of knowlege make sense if a crucial component in laser building ability is tacit knowledge.« (Collins 1985a: 56) Auch wenn die Laser-Experten es gewollt hätten, so wäre es ihnen dennoch nicht möglich gewesen, ihr gesamtes Wissen zu verbalisieren. Entsprechend lückenhaft erwiesen sich auch ihre schriftlichen Berichte. Ein großer Teil ihres Wissens war implizit und ihnen selbst nicht bewußt und konnte, wenn überhaupt, nur explizit gemacht werden im Rahmen von persönlichen Gesprächen, von konkreten Fragen und Nachfragen. Collins Studie ist ein aufschlußreiches Beispiel für die Relevanz impliziten Wissens und für die Bedeutung, die persönliche Kommunikation für die Vermittlung von Wissen, d.h. für den Lernprozeß besitzt (vgl. auch Kap. 8).

Die Tatsache, daß informelle Gespräche ein wesentliches Medium des Technologie-Transfers sind, sagt freilich noch nichts darüber aus, welches Wissen sich im Endeffekt durchsetzt. Konkret: weshalb sich das Von-Neumann-Design gegenüber allen anderen Varianten zu behaupten vermochte. Einen Hinweis darauf, wie eine Antwort auf diese Frage aussehen könnte, geben neuere wissenschaftssoziologische Studien zum 'Karriereverlauf' von wissenschaftlichen Theorien (vgl. auch Kap. 3). Was dort für den Prozeß der Theoriewahl nachgewiesen wird, scheint unter bestimmten Bedingungen auch für die Entwicklung von Technik gültig zu sein. Zumindest gilt dies für die Frühphase der Erfindung des Computers, als die Entwicklungsarbeit noch vorwiegend an Universitäten stattfand und man den Bau von Computern zur Hauptsache als eine Angelegenheit der Wissenschaft betrachtete.

Die Wissenschaftlern, mit denen H.M. Collins sprach, hatten keine Mühe zu beurteilen, ob der TEA-Laser, den sie gebaut hatten, funktioniert oder nicht. Es gab anscheinend, wenn auch vielleicht nicht immer bewußt, eine Reihe von allgemein akzeptierten Funktionskriterien, und es schien nicht weiter schwierig zu sein zu entscheiden, ob ein Gerät ihnen genügt oder nicht. Das ändert sich, sobald das Experiment (oder das Artefakt), das repliziert werden soll, von seiner Anlage her komplexer und/oder theoretisch neuartiger ist. In diesem Fall existieren noch keine allgemein akzeptierten Evaluationskriterien und unter Umständen ist die Beurteilung, ob die Replikation tatsächlich gelungen ist, theoretisch ausserordentlich voraussetzungsvoll. Diesen Zusammenhang illustriert H.M. Collins am Beispiel einer neuen Entdeckung, der Messung von Gravitationswellen (Collins 1985b). Ende der 60er Jahre stellte der amerikanische Physiker Joseph Weber die Behauptung auf, es sei ihm gelungen, ein Gerät zu entwickeln, mit dem sich die Gravitationsstrahlung, deren Existenz bis anhin nur theoretisch postuliert worden war, messen lasse. Das Gerät selbst war unvergleichlich viel komplexer als der TEA-Laser, und die Ergebnisse, die es produzierte, waren sehr viel schwieriger zu interpretieren. Grund dafür ist ein Mechanismus, den Collins als *experimentellen Zirkel* bezeichnet und der im Prinzip jedem Experiment und jedem Replikationsversuch inhärent ist: »What the correct outcome is depends upon whether there are gravity waves hitting the Earth in detectable fluxes. To find this out we must build a good gravity wave detector and have a look. But we won't know if we have built a good detector until we have tried it and obtained the correct outcome! But we don't know what the correct outcome is until .... and so on ad infinitum.« (Collins 1985b: 84)

Wenn der experimentelle Zirkel so offen zutage tritt, wie es beim Gravitationswellendetektor der Fall war, dann besteht offensichtlich noch kein Konsens darüber, woran man ermessen kann, ob die Apparatur tatsächlich die Leistung erbringt, für die sie gebaut worden ist, und wie die Resultate, die sie produziert, zu interpretieren sind. Messen sie tatsächlich die Gravitationsstrahlung – oder vielleicht doch etwas anderes? Diese Unsicherheit setzt einen kommunikativen Prozeß in Gang, in dessen Verlauf Argumente und Gegenargumente vorgebracht und geprüft werden, bis sich zum Schluß vielleicht ein Konsens bildet, wie das Experiment zu werten ist. »Where there is disagreement about what counts as a competently performed experiment, the ensuing debate is coextensive with the debate about what the proper outcome of the experiment is. The closure of debate about the meaning of competence is the 'discovery' or 'non-discovery' of a new phenomenon.« (Collins 1985b: 89) Oder wie es Michael Mulkay formuliert: »Beginning from significantly different interpretative positions, participants appeared to be working out, by a process of 'claim an counter-claim', the meaning of observations and there-by, indirectly, establishing the nature of the phenomenon with which they were concerned.« (Mulkay 1979a: 91)

Damit ist allerdings noch nichts darüber ausgesagt, wie dieser Kommunikationsprozeß konkret verläuft – inwieweit er dem universalistischen Ideal der Wissenschaft tatsächlich nahekommt. Neuere wissenschaftssoziologische Studien zur Theoriewahl weisen darauf hin, daß das 'vernünftige Argument' offenbar allein nicht auszureichen scheint, um den diskursiven Prozeß für sich zu entscheiden (vgl. Kap. 3). Vielmehr spielen wissenschaftliche Reputation, Zugang zu Information, Geschlechtszugehörigkeit, Publikationspolitik, kommunikative Techniken – und nicht zuletzt die Möglichkeit, am wissenschaftlichen 'Forum' überhaupt teilzunehmen – eine nicht unerhebliche Rolle für den Verlauf, den die Auseinandersetzung nimmt. So zeigt etwa Brian Wynne in seiner Studie über C.G. Barkla und dessen J-Strahlentheorie, daß soziale Faktoren und soziale Strategien die Akzeptanz (bzw. Ablehnung) einer wissenschaftlichen Theorie unter Umständen beträchtlich beeinflussen können (Wynne 1976; 1979). Für den Gang der Wissenschaft bedeutet dies, so Wynnes Fazit, »that beneath the 'official' world of universal standards of evaluation and control, there is a flexible world of negotiated interpretations and real judgements which is influenced by concrete social factors of the kind I have outlined – material power, the professional ideology and authority of science, and the status-rewards received by different scientists from different (if overlapping) reference groups.« (Wynne 1979: 80).

Zu einem ähnlichen Schluß gelangen auch H.M. Collins und Trevor J. Pinch in ihrer Studie über das Verhältnis von (etablierter) Wissenschaft und Parapsychologie (Collins/Pinch 1978). Die 'rationalen' Argumente, die von seiten der offiziellen Wissenschaft gegen die Parapsychologie vorgebracht werden, lassen sich über weite Strecken als nachträgliche Rationalisierungen einer Grundüberzeugung interpretieren, die selbst nie zur Disposition gestellt wird: Die empirischen Ergebnisse der Parapsychologie werden von vornherein als unwissenschaftlich abgetan, ohne sie im einzelnen auf ihre Glaubwürdigkeit hin zu prüfen. Dies hat sich allerdings in den letzten Jahren etwas geändert, und zwar als Folge einer erfolgreichen Statuspolitik von seiten der Parapsychologie. In den USA zumindest scheint es ihr gelungen zu sein, sich bis zu einem gewissen Grade zu etablieren. Parallel zum sozialen Erfolg – Anzeichen dafür sind etwa Anzahl der Lehrstühle, Höhe der Forschungsgelder, Einsitz in renommierten Fachverbänden etc. – hat sich auch die Haltung der etablierten Wissenschaft ihr gegenüber verändert: Die Thesen der Parapsychologie sind zumindest diskussionswürdig geworden. Das Beispiel der Parapsychologie führt damit anschaulich vor, daß die Akzeptanz einer Theorie mitunter auch vom Prestige jener abhängig ist, die sie vertreten.

Was in den Studien von Collins, Pinch und Wynne, um nur einige der einschlägigen Arbeiten zu erwähnen, für den Bereich der Wissenschaft nachgewiesen wird, scheint auch die frühe Computerentwicklung gekennzeichnet zu haben. Die Lösungen, die John von Neumann und seine Mitarbeiter vorschlugen, wurden im allgemeinen übernommen, ohne sie systematisch abzuwägen gegen andere Varianten. Indem man die Grundüberlegungen übernahm, wie sie vom IAS-Team entwickelt wurden (und auf diese Weise Unsicherheit und Komplexität beträchtlich reduzierte), gewann man Zeit für die Bearbeitung der noch offenen Probleme – ein gutes Beispiel für den Nutzen symbolisch generalisierter Kommunikationsmedien. Mehrere Maschinen, die in diesen Jahren entwickelt wurden, sind Kopien des IAS-Computers (oder Kopien von Kopien). Dazu gehören z.B. der MANIAC (Los Alamos, 1952), der JOHNNIAC (Rand Corporation, 1954), der PERM (Technische Hochschule München, 1954) und der EDSAC, der von Maurice Wilkes an der Universität von Manchester entwickelt wurde und bereits 1949, d.h. drei Jahren vor dem IAS-Computer, fertigstellt war (Aspray 1990a: 91). Wenn der IAS-Computer das 'exemplar' war, das beispielhafte Meister-Werk, dann waren die Forschungsberichte von John von Neumann und seinen Mitarbeitern die Theorie dazu. Zusammengenommen legten sie für lange Zeit fest, wie ein Computer auszusehen hat: »Les textes écrits autour de l'IAS (...) ont fondé la methodologie des ordinateurs.« (Ramunni 1989: 69)

Keine andere Gruppe entwickelte eine vergleichbare publizistische Aktivität, und keine andere Gruppe hatte eine vergleichbare Stellung inne, was wissenschaftliches Ansehen und Kommunikationsressourcen anbetraf. Diese diskursiven Kompetenzen – und nicht technische Faktoren allein – haben den Verlauf des Selektionsprozesses entscheidend mitbestimmt. »His scientific standing«, so William Aspray über John von Neumann, »was an important factor in winning over the scientific and funding communities, and it was a standing in stark contrast to that of most of the other pioneers of modern computing.« (Aspray 1990a: 4f.) Konrad Zuse und Alan Turing waren zwar beide maßgeblich an der Entwicklung des Digitalcomputers beteiligt, ihre Vorstellungen blieben aber weitgehend unbekannt und beeinflußten die weitere technische Entwicklung kaum. Im Falle von Turing blieb nicht bloß seine theoretische Leistung unbemerkt, auch sein praktischer Beitrag wurde kaum zur

Kenntnis genommen. »In the postwar conferences on the design of computers he was almost never cited«, schreibt Paul E. Ceruzzi. »Few persons attending them even knew who he was.« (Ceruzzi 1983: 134)[27] Turings Design für den ACE verschwand in den Archiven des *National Physical Laboratory* und wurde erst sehr viel später wiederentdeckt. Der ACE-Report ist, wie Jérôme Ramunni schreibt, »une source d'idées dans la recherche de solutions alternatives à ce qui était désormais couramment appelé l'architecture des ordinateurs 'à la von Neumann'« (Ramunni 1989: 87), nur waren es Ideen, die damals, als sich von Neumanns Konzeption durchzusetzen begann, keinen Eingang fanden in den Diskurs über das Design von Computern.[28] Ähnlich marginal blieben auch die Konstruktionsüberlegungen von Konrad Zuse. Zuse hatte zwar den ersten programmgesteuerten Digitalcomputer entwickelt und mit seinem *Plankalkül* auch die erste Programmiersprache entworfen. Beides wurde jedoch bis in die 60er Jahre nicht zur Kenntnis genommen, teilweise auch wider besseres Wissen, wie Zuse in seiner Autobiographie nicht ohne Bitterkeit vermerkt (Zuse 1984: 113f.).

In der Computergeschichte wird der Erfolg der Von-Neumann-Architektur normalerweise technikimmanent erklärt, als 'survival of the fittest technology' gewissermaßen. Durchgesetzt habe sich jenes Design, das in ökonomischer und technischer Hinsicht am besten 'funktionierte'. Was der 'Technikdarwinismus' als quasi-natürlichen Vorgang begreift, war jedoch Ergebnis eines diskursiven Prozesses, in dessen Verlauf festgelegt wurde, wie ein Computer in Zukunft auszusehen hatte. Ob die technischen Lösungen, für die man sich damals entschied, auch 'objektiv' die besten waren, ist so wenig eindeutig zu beantworten wie die Frage nach dem Wahrheitsvorsprung eines wissenschaftlichen Paradigmas (vgl. Kap. 3). Eine solche Beurteilung setzte objektive und universell akzeptierte Kriterien voraus, und auch in diesem Fall könnte immer noch strittig sein, ob eine spezifische technische Lösung (bzw. ein wissenschaftliches

---

27 Eine Ausnahme war John von Neumann, dem Turings theoretische Arbeit bekannt war und der viel von ihr hielt; vgl. dazu Aspray 1990a: 178; Hodges 1989: 351. Von Neumann und Turing hatten sich zum ersten Mal 1938 in Princeton getroffen, wo sich Turing im Rahmen eines Forschungsaufenthaltes ein Jahr lang aufhielt. Ein weiteres Mal begegneten sie sich in England während des Krieges, und 1947 besuchte Turing anläßlich seiner Teilnahme an der Harvard-Tagung über *Large-Scale Digital Calculating Machinery* auch das IAS-Team am Institute of Advanced Study (Aspray 1990a: 100).

28 Turings Schriften zum ACE-Computer sind erst vor kurzem veröffentlicht worden in Carpenter/Doran 1986.

Paradigma) diese Kriterien erfüllt oder nicht. Die Beurteilung einer technischen Lösung als 'gut' (und einer anderen als vergleichsweise 'schlechter') ist nicht allein durch den Gegenstand determiniert, so wenig wie sich die Beurteilung von wissenschaftlichen Hypothesen zwingend aus den Forschungsergebnissen herleitet. Zu welcher Beurteilung man gelangt, welche technischen Varianten selegiert werden (und welche in Vergessenheit geraten), ist auch abhängig von den Deutungssystemen, an denen man sich orientiert, und von der Struktur des kommunikativen Prozesses, in dessen Verlauf sich eine gemeinsame Sicht herauskristallisiert. Über die Leistungsfähigkeit von neuen technischen Lösungen wird, pointiert formuliert, ebenso entschieden wie über den Wahrheitswert von Hypothesen oder die Bedeutung von Beobachtungen, und zwar im Rahmen von 'Aushandlungsprozessen', denen auch soziale Dimensionen eigen sind.

Aus dieser Sicht stellt sich technische Entwicklung nicht mehr als gradliniger Fort-Schritt dar, als eingleisiger Weg hin zur immer perfekteren technischen Lösung, sondern als ein selektiver und diskontinuierlicher Prozeß, der sich phasenweise in verschiedenste Richtungen verzweigt, um dann wieder auf einen Punkt hin konzentriert zu werden. Was sich in der Retrospektive als Erfundenes präsentiert – der 'technische Fortschritt' gewissermaßen –, bezeichnet meistens eine Variante aus einem ganzen Bündel gleichberechtigter Lösungen. Jene Variante, die sich durchsetzt, begründet ein technisches Paradigma, ein handlungsleitendes Modell, an dem sich das technische Handeln von nun an orientiert (Dosi 1982). Trevor J. Pinch und Wiebe E. Bijker sprechen in diesem Zusammenhang von 'Schließung': »Closure in technology involves the stabilization of an artifact and the 'disappearance' of problems. To close a technological 'controversy', one need not *solve* the problems in the common sense of that word. The key point ist whether the relevant social groups *see* the problem as being solved.« (Pinch/Bijker 1987: 44) Genau das geschah Anfang der 50er Jahre, als sich die Von-Neumann-Architektur als handlungsleitendes Modell durchsetzte.

## 2. Vom Kalkulator zum Elektronengehirn
### *Die kulturelle Erfindung des Computers*

> If it should ever turn out that the basic logics of a machine designed for the numerical solution of differential equations coincide with the logics of a machine intended to make bills for a department store, I would regard this as the most amazing coincidence that I have ever encountered.
>
> *Howard Aiken*[29]

Mit der Durchsetzung der Von-Neumann-Architektur war die technisch-logische Grundkonstruktion des Computers, sein Design, zunächst einmal abgeschlossen. Was anschließend folgte, waren immanente Verbesserungen im Rahmen der einmal gewählten Architektur – 'Normaltechnik' gewissermaßen. Nicht abgeschlossen war hingegen die *kulturelle* Konstruktion des Computers – seine Deutung und Funktionsbestimmung. Ursprünglich waren Computer zum Zwecke numerischer Berechnungen entwickelt worden. Ihr Anwendungsgebiet sah man primär im Bereich des wissenschaftlich-technischen Rechnens. Entsprechend wurden sie anfänglich ausschließlich an Universitäten und für militärische Zwecke eingesetzt. Die Idee, daß Computer mehr können als bloß rechnen (und folglich auch vielseitiger verwendbar waren), setzte sich erst allmählich durch – obschon mit Turings Arbeit eine solche Deutung an sich bereits vorgelegen hätte.

Noch Ende der 40er Jahre war man allgemein davon überzeugt, daß ein oder zwei Computer pro Land den Bedarf an Rechenkapazität bei weitem abdecken würden. »There will never be enough problems, enough work for more than one or two of these computers«, beschied Howard Aiken Ende der 40er Jahre in einem Gutachten (zit. in Stern 1981: 111), und zu einer ähnlichen Prognose gelangte auch Douglas R. Hartree, der in England maßgeblich an der Entwicklung und Einführung des modernen Computers beteiligt war. Hartree habe, so berichtet Rt. Hon. The Earl of Halsbury zehn Jahre später und bereits etwas befremdet, »completely underestimated the extent to which digital computers would prove to be pervasive. He at first foresaw them only as magnificent tools in the hands of a chosen few skilled in numerical analysis, and considered that in the full flower of their development one or two per nation would suffice for all imaginable needs.« (Halsbury 1959: 155) Damals, als Aiken und Hartree ihre Prognose vorbrachten, waren elektronische Computer

29 Zit. in Ceruzzi 1986: 197.

allerdings tatsächlich noch eine Seltenheit: 1950 waren weltweit erst sechs in Betrieb (Ceruzzi 1989: 262). Fünf Jahre später hatte sich die Situation grundlegend verändert. Paul Ceruzzi zufolge waren 1955 mehr als 3000 Computer installiert, verteilt auf 15 Länder (Ceruzzi 1989: 262).[30]

Zwei Jahre früher war eine Marktanalyse, die IBM in Auftrag gegeben hatte, zum Schluß gekommen, daß für den IBM 650, der sich später gewissermaßen als das Fordsche Model T der Computerindustrie erweisen sollte, kaum ein Markt bestehe. Es würden sich höchstens 250 Stück absetzen lassen – 1955 hatte man bereits mehr als 2000 verkauft (Ceruzzi 1986: 191). Daß nicht nur Fachleute wie Howard Aiken oder Douglas R. Hartree sich zu dermaßen falschen Prognosen verstiegen, sondern auch markterprobte Unternehmen wie IBM, scheint vor allem zwei Ursachen gehabt zu haben. Zum einen wurde der Einsatzbereich des Computers ausschließlich von den Funktionen her definiert, für die er ursprünglich entwickelt worden war. Von den Aufgaben, die er in der Gegenwart übernahm, schloß man direkt auf seine zukünftige Rolle. Ähnlich wie die ersten Autokonstrukteure das Automobil zunächst einmal als Fortführung der Pferdekutsche interpretierten und die 'auto-mobile' Gesellschaft in keiner Weise zu antizipieren vermochten, realisierten auch die Erfinder des Computers nicht, daß diese neue Technik neue Aufgaben und neue Bedürfnisse nach sich ziehen könnte. In den Augen der Computerpioniere war der Computer nichts weiter als ein Ersatz für das vertraute Rechensystem, das bis anhin aus Menschen, Rechenmaschinen, Anweisungen, Bleistift und Papier bestanden hatte. Genau darauf weist Alwin Walthers Formulierung hin: »Ein Rechenautomat zieht die aus einer gewöhnlichen Büro-Rechenmaschine und der sie bedienenden menschlichen Rechnerin (!) bestehende Zweiheit zu einer Einheit zusammen.« (Walther 1956: 13)

Der zweite Grund für die Fehleinschätzung der künftigen Rolle des Computers war die Art und Weise, wie er damals definiert wurde. »The perception of a modest and limited future for electronic computing came, most of all, from misunderstandings of its very nature«, schreibt Paul Ceruzzi. »The computer pioneers understood the concept of a computer as a general-purpose machine, but only in the narrow sense of its ability

30 Zu einer ganz anderen Einschätzung gelangt allerdings William Aspray. Asprays Angaben zufolge waren 1955 erst 200 elektronische Computer in Betrieb (Aspray 1986: 351). Aufgrund der Hinweise, die die beiden Autoren geben, ist nicht klar auszumachen, was der Grund für diese enorm differente Einschätzung sein könnte. Eine mögliche Interpretation ist die, daß Aspray im Gegensatz zu Ceruzzi nur das Modell – und nicht die Stückzahl – gerechnet hat. Von den 3000 Computern, die Ceruzzi angibt, ist der IBM 650 mit mehr als 2000 Stück vertreten.

to solve a wide range of mathematical problems. Largely because of their institutional backgrounds, they did not anticipate that many of the applications computers would find would require the sorting and retrieval of non-numeric data.« (Ceruzzi 1986: 192; 197) Für die damaligen Computerpioniere war der Computer eine gigantische Rechenmaschine – und nicht, wie man von Alan Turing hätte lernen können, eine *symbol*verarbeitende Maschine. Noch 1956, als man in der populären Diskussion die Büros von 'Elektronenhirnen' bevölkert sah, konnte Howard Aiken keine Gemeinsamkeiten entdecken zwischen den 'computers', wie er sie mitentwickelt hatte, und den Maschinen, die man in dieser Zeit für kommerzielle Zwecke zu verwenden begann: »If it should ever turn out that the basic logics of a machine designed for the numerical solution of differential equations coincide with the logics of a machine intended to make bills for a department store, I would regard this as the most amazing coincidence that I have ever encountered.« (Zit. in Ceruzzi 1986: 197)

Die anfängliche Zwecksetzung des Computers spiegelt sich auch in seiner Bezeichnung. Mit 'computer' bezeichnete man ursprünglich die menschlichen – und zumeist weiblichen – Rechner, die von Hand die rein mechanische Zahlenarbeit leisteten für komplexe wissenschaftliche oder technische Berechnungen. Welche Rechenoperationen sie in welcher Reihenfolge auszuführen hatten, war dabei im Detail vorgeschrieben. Das technische Rechnen sei schon vor der Erfindung des Computers »sehr gut 'programmiert'« gewesen, schreibt Konrad Zuse in seiner Autobiographie, den der Versuch, dieses Rechenverfahren noch weiter zu rationalisieren, zur Entwicklung des Digitalcomputers geführt hatte (Zuse 1970: 35). In Zuses Überlegungen bildeten, wie Hartmut Petzold schreibt, »Rechenschema und Rechenmaschine eine Einheit, die er in einem neuartigen, möglichst weitgehend automatisierten Gerät technisch zusammenfassen wollte (...) Offenbar liegt ein Schlüssel für die grundsätzlichen Beiträge Zuses zur Computerentwicklung darin, daß er das System aus Rechenschema und Vierspeziesmaschine (und Rechnerin, B.H.) (...) aus dem damals gängigen Blickwinkel des Rationalisierungsingenieurs als zu mechanisierende und rationalisierende Einheit sah. Im Gegensatz zu anderen zu rationalisierenden Arbeitsgängen brauchte die Rechenarbeit nicht mehr zerlegt zu werden.« (Petzold 1985: 293)

'Programmierer' war der Ingenieur oder Wissenschaftler, der die mathematische Aufgabe in einfachste Rechenoperationen zerlegte und sie anschließend in einem sog. 'Rechenplan' zusammenfaßte. Dieser Rechenplan, er entspricht dem Programm, gab die Vorlage ab, nach der die Rechnerinnen – sie repräsentieren das Rechenwerk – addierten oder multiplizierten, rein mechanisch, Schritt für Schritt, ohne Einblick zu haben in den Problemzusammenhang. »Taken together«, so Paul Ceruzzi, »the person, the calculator, the pencil and 'scratch' paper, and the list of instructions formed a system which could solve a wide range of numerical problems, as long as the the solutions to those problems could be specified as a series of elementary steps. That human and mechanical system was precisely what the first digital computers replaced.« (Ceruzzi 1983: 5)

Bis sich durchgesetzt hatte, daß 'computer' nun nicht mehr einen Menschen, sondern eine Maschine bezeichnete – oder wie George Stibitz 1945 vorschlug: »Human agents will be referred to as 'operators' to distinguish them from 'computers' (machines)« (zit. in Ceruzzi 1983: xi) –, dauerte es relativ lange. In den ersten Memoranden ist noch von »automatic calculating machine« (Aiken), »electronic computor« (Mauchly), »automatic computing system« (von Neumann) oder von »Universal-Rechenmaschine« (Zuse) die Rede, und noch Mitte der 50er Jahre taucht der Computer in Friedrich Pollocks Sachregister als »computor« auf und wird von ihm mit »elektronischer Riesenkalkulator« übersetzt. Gleichzeitig, und das indiziert einen grundlegenden Bedeutungswandel, verweist Pollock unter dem Stichwort 'computor' auf den für ihn offenbar synonymen Begriff des 'giant brain', eine in den 50er Jahren äußerst populäre Bezeichnung, ähnlich beliebt wie im deutschen Sprachraum das 'Elektronengehirn' (Pollock 1956a).

Ende der 50er Jahre ist der Umdeutungsprozeß dann abgeschlossen. In der öffentlichen wie wissenschaftlichen Diskussion wird der Computer nicht mehr als 'calculator' gesehen, sondern als eine Art 'Gehirn', das imstande ist Denken zu simulieren – und nicht bloß Rechnen. Wilhelm Bittorf spricht von »Denkmaschinen« (Bittorf 1956), Friedrich Pollock von einer »Ersetzung von Gehirnfunktionen durch elektronische Geräte« (Pollock 1956b: 69), und für Adolf Galliker wird die »Kopfarbeit« in den Büros bereits durch »Roboter« erledigt. »Denn das Elektron (!) ist ein kleines Wunder. Es kann auch denken, rechnen, fühlen und messen und dies in unvorstellbar kurzer Zeit.« (Galliker 1956: 5)

Dies sind nur einige Beispiele. Sie machen aber deutlich, daß man den Computer, den man einige Jahre zuvor noch als gigantische Rechenmaschine betrachtet hatte, als 'computer' eben, nun mit 'Gehirn' und 'Denken' zu assoziieren begann. Anstatt bloß zu rechnen, schien er nun auf einmal 'Informationen' zu verarbeiten, anstatt Zahlen zu stapeln, speicherte er Symbole. Sein »Gattungsname 'computer'«, schreibt Friedrich Pollock, der ansonsten bekanntlich eher der Kritik der instrumentellen Vernunft verpflichtet war, gebe eine »falsche Vorstellung von einem Gerät, das die Fähigkeit besitzt, Informationen zu empfangen und in einer Weise rechnerisch und logisch zu verarbeiten, die von nicht hochqualifizierten Fachkräften häufig überhaupt nicht und von den letzteren nur mit einem unvergleichlich viel größeren Zeitaufwand erreicht werden kann« (Pollock 1956a: 20). In der kulturellen Wahrnehmung wandelte sich der Computer von einem gigantischen 'calculator' zu einer Symbolmaschine, zu einem 'physical symbol system' (Newell/Simon), dem menschlichen Gehirn prinzipiell vergleichbar (vgl. Kap. 8). Mit dieser kulturellen Re-Konstruktion des Computers veränderte sich auch die Wahrnehmung seines Funktionsbereiches: er ließ sich offenbar überall dort einsetzen, wo Informationen zu verarbeiten waren, in Bereichen mithin, die bislang als mechanisierungsresistent gegolten hatten. Dem »menschlichen Gehirn« verbleibe, wie Walter Bittorf tröstend schrieb, zwar nur eine kleine, dafür aber um so anspruchsvollere Aufgabe: »Entscheidungen zu fällen und Maßstäbe zu setzen.« (Bittorf 1956: 128)

Kapitel 7

# Algorithmus und Maschinerie

## *Die Bedeutung von Turings Maschinenbegriff für die Techniksoziologie*

> Das Zusammenwirken von Maschinenteilen z.B. erfolgt ganz in dem gleichen 'logischen' Sinne nach 'menschlich gesetzten Regeln' wie das Zusammenwirken gewaltsam zusammengekoppelter Zugpferde oder Sklaven oder endlich – dasjenige 'freier' menschlicher Arbeiter in einer Fabrik.
>
> *Max Weber*[1]

> Die Tiller Girls das war ein Typ tanzender Mädchen – gedrillte, nach bestimmten einfachen Techniken geübte Tanzkörper, Bewegungsmaschinen, von teilweise sehr frappanter Wirkung.
>
> *Fritz Giese*[2]

Im selben Jahr, als Alan Turing seine Maschinendefinition des Algorithmusbegriffs entwickelte, gelangte der amerikanische Mathematiker Emil Post zu einer ganz ähnlichen Idee. Ein Algorithmus, so überlegte er sich, ist etwas, was rein mechanisch ausgeführt werden kann – z.B. von einem Arbeiter an einem Fließband, der Schritt für Schritt Anweisungen ausführt, ohne je davon abzuweichen. Emil Post entwarf bis ins kleinste Detail genau dasselbe Modell wie Alan Turing, nur war der Ausführende bei ihm nicht eine 'Maschine', sondern ein 'Fließbandarbeiter', der völlig mechanisch seinen Instruktionen folgt. Beide Präzisierungen des Algorithmus-Begriffs erwiesen sich als äquivalent (vgl. Kap. 4). Was Emil Post am Beispiel eines 'Arbeiters' veranschaulichte, illustrierte Turing anhand einer 'Maschine'. Die zugrundeliegende Idee blieb sich jedoch gleich: Das Befolgen eines Algorithmus ist ein Prozeß, dessen Ausführung keine Abweichung, keinen Spielraum erlaubt. Es gibt immer nur *eine* Möglichkeit, ans Ziel zu gelangen: »The very nature of a definite method (is) that it had to be applied *mechanically*.« (Hodges 1988: 4)

Die Austauschbarkeit von Turings 'Maschine' und Posts 'Fließbandarbeiter' weist auf einen Zusammenhang hin, der ein neues Licht werfen könnte auf das klassische Verständnis von 'Maschine'. Offenbar ist nicht das Maschinenhaft-Materielle an Turings Maschine das Entscheidende, sondern das Algorithmische. Was Turings 'Maschine' tut, läßt sich ge-

---

1 Weber 1907: 325.

2 Giese 1925, zit. in Schütz 1986: 164.

nausogut durch einen 'Fließbandarbeiter' verwirklichen – und umgekehrt. Daß beide unterschiedlich gebaut sind, ist nicht von Belang. Die Abfolge von Operationen und das Ergebnis bleiben sich in jedem Fall gleich. Der Gedanke, daß der abstrakte algorithmische Prozeß und seine praktische Implementation auseinanderzuhalten sind, wird jedoch nicht nur durch die Äquivalenz von Turings und Posts Präzisierung des Algorithmus-Begriffs nahegelegt. Es gibt noch eine andere Überlegung, die in eine ähnliche Richtung weist.

Wie ich im vorhergehenden Kapitel ausgeführt habe, ist die Art und Weise, wie Turings 'Maschine' technisch realisiert ist, für seine Argumentation nicht von Bedeutung. Aus welchen Werkstoffen eine 'reale' Turingmaschine besteht, wie die einzelnen Teile aussehen und auf welche Weise sie zusammengefügt sind – all dies hat keinen Einfluß auf die Gültigkeit von Turings Überlegungen. »The 'logical description' of a Turing machine does not include any specification of the *physical nature* of these 'states' – or indeed, of the physical nature of the whole machine. (Shall it consist of electronic relays, or cardboards, or human clercs sitting at desks, or what?) In other words, a given 'Turing machine' is an *abstract* machine which may be physically realized in an almost infinite number of different ways.« (Putnam 1975b: 371) Die funktionalistische Idee, daß ein Algorithmus auf verschiedene Weise praktisch verwirklicht sein kann, läßt sich meiner Ansicht nach auch für die Techniksoziologie fruchtbar machen. Mit seiner konzeptuellen Entflechtung von Mechanismus und gerätetechnischer Apparatur hat Turing ein begriffliches Instrumentarium entwickelt, das nutzbar gemacht werden könnte für die Entwicklung eines soziologischen Technik- bzw. Maschinenbegriffs.

Technik ist ein Grundfaktor menschlicher Gesellschaften, und das gilt erst recht für die moderne Gesellschaft. Um so erstaunlicher ist es, daß auf der Ebene der allgemeinen Soziologie bislang kein eigenständiger Technikbegriff entwickelt wurde. Begriffe wie 'Technik', 'technischer Fortschritt', 'Technisierung' etc. kommen zwar beliebig häufig vor, ohne daß aber hinlänglich klar gemacht würde, was 'Technik' *soziologisch* gesehen heißt und wie sich ein solcher Begriff zu anderen soziologischen Grundkategorien wie Handlung, Organisation, Gesellschaft, Individuum etc. verhalten könnte. Erst in jüngster Zeit gibt es Versuche, einen eigenständigen soziologischen Begriff von Technik und Maschine zu entwickeln. Diese konzeptuellen Bemühungen stehen im Zusammenhang mit dem Aufkommen der Techniksoziologie als einer neuen Teildisziplin innerhalb der Soziologie. Noch 1979 stellte Helga Nowotny in ihrer

Studie *Kernenergie: Gefahr oder Notwendigkeit?* fest, daß es bislang »keine Techniksoziologie gibt und daß sich Soziologen nicht in nennenswertem Umfang mit Fragen der technischen Auswirkungen und den Voraussetzungen für technische Innovation befaßt haben« (Nowotny 1979: 262). Drei Jahre später erscheint die erste deutschsprachige Aufsatzsammlung zur Techniksoziologie. Die Frage, ob die Techniksoziologie eine neue Bindestrichsoziologie sei, beantwortet Rodrigo Jokisch in seinem Vorwort mit einem »ja und nein«. Die Aufsatzsammlung selbst sei ein Versuch, »zumindest einige kognitive Voraussetzungen für die Institutionalisierung einer solchen Techniksoziologie zu ermöglichen« (Jokisch 1982: vii).[3] Ende der 80er Jahre scheint sich die Techniksoziologie – zumindest im deutschsprachigen Raum, auf den ich mich im folgenden beziehe – einigermaßen etabliert zu haben. In den in diesen Jahren erschienenen Aufsatzsammlungen wird die Existenz einer eigenständigen Techniksoziologie jedenfalls als gegeben vorausgesetzt (Joerges 1988a; Weingart 1989).

Um sich als eigenständige Disziplin zu behaupten, muß sich eine Soziologie der Technik gegen zwei Seiten hin abgrenzen – zum einen gegenüber ihren soziologischen Nachbardisziplinen, insbesondere der Wissenschafts- und Industriesoziologie, zum anderen aber auch gegenüber den Ingenieurwissenschaften. Aus der Perspektive der Techniksoziologie ist Technik mehr als ein bloßes Anhängsel der Wissenschaft, und ihre Bedeutung reicht über den Bereich der industriellen Produktion hinaus. Genau besehen ist es jedoch nicht der Gegenstandsbereich, über den sich die Techniksoziologie als eigenständige Disziplin konstituiert, denn genau ihn teilt sie ja z.B. mit den Ingenieurwissenschaften. Vielmehr ist es eine ihr spezifische Sicht der Dinge, die ihre Besonderheit ausmacht bzw. ausmachen müßte. Was Niklas Luhmann für die Soziologie allgemein postuliert, daß sie nicht »über Gegenstände (Gegenstandsarten), also nicht über Ausschnitte der realen Welt, sondern über eine Problemstellung konstituiert ist« (Luhmann 1981: 195f.), gilt im kleinen auch für die Techniksoziologie.[4] So stellen sich technische Artefakte aus einer soziologischen Perspektive nicht als Erzeugnisse dar, die »unter Benutzung der

3 Jokisch bezieht sich dabei explizit auf Helga Nowotnys Bemerkung zum Stand der Techniksoziologie.

4 Diese Sichtweise impliziert auch, daß die Aufteilung zwischen technischen und sozialen Phänomenen nicht einfach in der Sache selbst begründet, sondern kulturell konstruiert ist. Je nach Beobachterperspektive stellt sich die Grenzziehung anders dar – und werden die Grenzen auch aktiv anders gezogen; vgl. als Illustration Callon 1987.

Stoffe und Kräfte der Natur und unter Berücksichtigung der Naturgesetze« hergestellt werden (obwohl sie das auch sind), sondern als »'natural realisierte' soziale Struktur« (Joerges 1989a: 61), als »geronnene kognitive Systeme« (Weingart 1982: 114), als »materialisierter Ausdruck von sozialen Sinnbezügen und (...) Träger von kollektiven Wertvorstellungen« (Hörning 1989: 100) oder aber als »Medium der Kommunikation« (Rammert 1989a: 161), um nur einige der vorgeschlagenen soziologischen Konzeptualisierungen von Technik aufzuzählen. Im folgenden möchte ich drei soziologische Technikmodelle kurz vorstellen, um anschließend auf die Frage zurückzukommen, ob Turings Idee, zwischen dem Algorithmus selbst und seiner praktisch-technischen Implementation zu unterscheiden, nicht etwas Ordnung bringen könnte in die doch etwas verwirrliche – und mitunter auch etwas verworrene – techniksoziologische Diskussion.[5]

(1) Bernward Joerges versucht Technik über den Begriff der *Norm* theoretisch zu fassen (u.a. Joerges 1988b; 1989a; 1989b). Im Anschluß an die Strukturtheorie (vor allem Durkheimscher Provenienz) betrachtet er technische Artefakte als eine Art 'normative Systeme'. Während Durkheim Technik primär unter dem Aspekt des Zwangs thematisierte, den sie auf die Menschen ausübt, die sie benutzen oder bedienen, geht Joerges einen Schritt weiter. In seinen Augen wirken sich die in technischen Geräten 'inkorporierten' Normen nicht nur bestimmend auf das menschliche Anschlußhandeln aus, sondern steuern auch das maschinelle Verhalten selbst. Technik ist, so Joerges' Begriffsbestimmung, als »'äussere', handelnden Subjekten gegenüberstehende soziale Struktur (zu konzipieren), und zwar in einem doppelten Sinn. Einmal als ein System unpersönlicher, einzelnen nicht unmittelbar verfügbarer (technischer) Regeln und Normen; zum andern als eine Handlungsebene, die in hohem Maß 'entkörperlicht', im Medium nicht-körperlicher naturaler Prozesse verwirklicht ist.« (Joerges 1989a: 46)

Joerges 'realistische' Techniksoziologie richtet sich gegen den Ausschluß der Sachen aus der Soziologie. Kritisiert wird dabei einerseits die weitgehende Vernachlässigung der materiellen Kultur in der allgemeinen Soziologie, aber auch ihre 'Entgegenständlichung' innerhalb der Techniksoziologie selbst (vor allem im Zuge sozialkonstruktivistischer Technikmodelle). Technik ist gewissermaßen mehr – und auch etwas 'här-

5 Ich werde diese verschiedenen Technikkonzeptionen nicht in extenso darstellen, sondern sie auf jene Punkte reduzieren, die für meinem Zusammenhang wesentlich sind.

teres' – als es die konstruktivistische Perspektive nahelegt.[6] Sie läßt sich ebensowenig wie andere soziale Tatbestände auf die Binnenperspektive der Betroffenen reduzieren. Dinge, und das betrifft insbesondere auch ihre materielle Dimension, gehören zum direkten Gegenstandsbereich der Soziologie – und sind nicht bloß, um Max Webers Formulierung aufzunehmen, »Anlaß, Ergebnis, Förderung oder Hemmung menschlichen Handelns« (Weber 1921: 3).

Eine 'harte' Techniksoziologie, wie sie u.a. Joerges vertritt, will die Sachen, gerade auch in ihrer stofflichen Dimension, zurückgewinnen für die Soziologie – aber wie? Daß Schreibtische, Eisenbahnen und Kühlschränke zur sozialen Welt gehören, mag auf den ersten Blick unmittelbar einleuchten. Aber auf den zweiten? Was macht ihre Bedeutung aus? Was ist an ihnen das *soziologisch* Relevante? Ist es ihre Materialität – ihre 'Physis' gewissermaßen? Diese materielle Dimension scheint z.B. Karl H. Hörning im Sinn zu haben, der in seinem Plädoyer für einen Einbezug der Dinge in die Soziologie das »Ignorieren der physisch-materiellen Aspekte der technischen Dinge« beklagt und der theoretischen Soziologie vorwirft, sie habe über weite Strecken die Sachwelt »entmaterialisiert« (Hörning 1989: 94; 95). Für Hörning ist es offenbar der materielle Charakter der Sachen, ihre *physische* Präsenz gewissermaßen, die das Spezifische an den Dingen ausmacht.

Demgegenüber scheint Hans Linde, auf den sich übrigens praktisch alle 'sach-bezogenen' Techniksoziologen berufen, eine ganz andere Dimension von 'Sache' im Auge zu haben (Linde 1982). Bei seinem Versuch, den Dingen in der Soziologie mehr Raum zu verschaffen, geht es ihm weniger um ihre materielle Dimension als vielmehr um ihren quasinormativen Charakter. Relevant an den Sachen ist nicht ihre Stofflichkeit bzw. ihre Materialität, sondern die Tatsache, daß von ihnen eine Art 'Sachzwang' ausgeht. Sachen sind für Linde eine »eigenständige (...) Klasse von Regelungskomplexen«, die sich von sozialen Institutionen nicht prinzipiell unterscheiden (Linde 1982: 29). Sie sind ein 'fait social', ganz im Sinne wie Emile Durkheim diesen Begriff ursprünglich eingeführt hat. Ein 'soziologischer Tatbestand' ist, so Durkheims berühmte Definition in den *Regeln der soziologischen Methode*, »jede mehr oder minder festgelegte Art des Handelns, die die Fähigkeit besitzt auf den Einzelnen einen äußeren Zwang auszuüben« (Durkheim 1895: 114).

6 Beispielhaft für den sozialkonstruktivistischen Ansatz sind eine Reihe von Beiträgen in den von MacKenzie/Wajcman 1985, Bijker u.a. 1987 und Bijker/Law 1992 herausgegebenen Sammelbänden.

Soziale Tatsachen bilden eine Realität sui generis, die sich dem Individuum von außen auferlegt und sein Verhalten in ganz bestimmte Bahnen lenkt. Als Beispiele für soziale Tatsachen führt Durkheim Rechtsnormen an, religiöse Dogmen, Erziehungspraktiken etc., aber auch materielle Artefakte. Aus seiner Perspektive gibt es keinen theoretischen Grund dafür, soziale Normenkomplexe und technische Geräte kategorial zu unterscheiden. Materielle Dinge sind nicht etwas grundsätzlich anderes als die immateriellen Gebilde, von denen die Soziologie normalerweise handelt. Wie diese – und im Gegensatz etwa zu einem Felsblock, der im Wege liegt –, wirken sie normativ auf den Handelnden ein, und zwar über die Regeln ihres Gebrauchs. In einem buchstäblicheren Sinne noch als soziale Institutionen sind sie »Gußformen, in die wir unsere Handlungen gießen müssen« (Durkheim 1895: 126). Soziologisch bedeutsam ist folglich nicht die Materialität der Sachen, sondern ihr normativer Charakter.[7]

Diese, wie Linde es formuliert, »funktionale Ineinssetzung von immateriell 'gesatzten', sittlichen oder rechtlichen Normen und handgreiflichen 'gemachten' Sachen« (Linde 1982: 4) ist für ihn – wie auch für Joerges – theoretischer Ausgangspunkt für die geforderte Eingemeindung der 'Dinge' in die Soziologie. Bernward Joerges geht jedoch, wie bereits angemerkt, einen entscheidenden Schritt darüber hinaus. Normen regulieren in seiner Sicht nicht nur das menschliche Anschlußverhalten, sondern auch die Operationsweise des technischen Gerätes selbst: »Was spricht dagegen, Systeme technischer Normen, die den Ablauf maschineller Operationen regulieren, vereinfachend in ähnlicher Weise als normative Strukturen zu fassen, wie wir das für bestimmte andere normative Funktionen zu tun gewohnt sind?« (Joerges 1989a: 44) Um die These eines normgesteuerten maschinellen Verhaltens einigermaßen plausibel machen zu können, muß präzisiert werden, was unter 'Norm' – vor allem auch in einem technischen Zusammenhang – genau zu verstehen ist. Dazu unterscheidet Joerges zunächst einmal zwischen technischen und sozialen Normen. Während er soziale Normen in hergebrachter Weise als »gegenseitige Verhaltensvorschriften mit Legitimationshintergrund« bestimmt, definiert er technische Normen parallel dazu als »auf Dauer gestellte Verhaltensanweisungen an Geräte mit Legitimationshintergrund« (Joerges

[7] Karl H. Hörning spricht in diesem Zusammenhang kritisch von einem »übervergesellschafteten Dingbegriff«. Die Durkheim-Tradition, die nicht mehr zwischen der materiellen und der sozialen Welt der Dinge unterscheide, beraube die Dinge »ihrer nicht-sozialen Dimensionen« (Hörning 1989: 95).

1989b: 244; 250).[8] Im einzelnen unterscheidet er zwischen drei verschiedenen Typen von technischen Normen:

(a) Normen für *menschliches Verhalten*: Solche technischen Handlungsnormen sind z.B. in Gebrauchsanweisungen formuliert: »Packen Sie den Tonerbehälter aus und schwenken Sie ihn vorsichtig, um das Tonerpulver gleichmäßig zu verteilen.«[9] Bei alltäglichen technischen Artefakten brauchen die technischen Handlungsnormen allerdings kaum (mehr) explizit formuliert zu werden, und wenn man es doch tut, reicht, wie im obigen Beispiel, eine sehr allgemein gehaltene Formulierung aus: »Packen Sie den Tonerbehälter aus.« Die dazu erforderlichen 'Subroutinen' – »Stellen Sie den Tonerbehälter auf eine gerade Fläche; nehmen Sie eine Schere in die Hand; schneiden Sie die Verpackung an den oberen Rändern auf etc.« – können problemlos als bekannt vorausgesetzt werden: sie sind Teil des impliziten Wissens in unserer Kultur.[10] Es ist diese Art von technischen Normen, die Durkheim im Sinn hatte, als er vom Zwangscharakter technischer Artefakte sprach.

(b) Normen für *maschinelles Verhalten*: Joerges führt hier als Beispiel Normen an wie DIN A 4, 220V oder 'max. 10 l Benzinverbrauch pro 100 km'.

(c) Normen für die *natürliche Umwelt*: Ein Beispiel dafür sind Grenzwerte.

Es sind die Normen für maschinelles Verhalten, die gerätetechnischen Normen im engen Sinn, die im Zentrum von Joerges' Argumentation stehen und die Differenz ausmachen zu Durkheims (und Lindes) Tech-

8 Die Beziehung zwischen sozialen und technischen Normen stellt Joerges über eine Art 'Substitutionsthese' her. In seiner Sicht werden soziale Strukturen durch technische substituiert und damit gleichzeitig unsichtbar gemacht: »Im historischen Verlauf verlegen moderne Gesellschaften große Teile ihrer Sozialstruktur in maschinentechnische Strukturen, die mehr oder weniger erfolgreich versiegelt, dem Alltagsbewußtsein der Bürger entzogen werden. Sozialstruktur wird externalisiert. Mit der immer umfangreicheren Abwicklung sozialer Transaktionen über komplexe Maschinerien werden soziale Strukturanteile immer tiefer in die naturale Ebene der Gesellschaft eingelassen. Damit werden Sozialstrukturen entbehrlich, ja es kann der Eindruck vom 'Verschwinden des Sozialen' (...) entstehen. Aber Externalisierung in technische Systeme bedeutet nicht, daß soziale Strukturen verschwinden, sie werden nur tendenziell *unsichtbar* gemacht.« (Joerges 1989b: 242f. ) Die 'Verdinglichung' von Klassifikations- und Beurteilungskriterien in Datenbanken oder Personalüberwachungssystemen ist ein aktuelles Beispiel dafür.

9 Benutzerhandbuch LaserWriter, S. 7.

10 H.M. Collins illustriert dies am Beispiel von Spielautomaten. Bei den ersten Flipperkästen Anfang des letzten Jahrhunderts wurde noch minutiös beschrieben, auf welche Weise man die Spielmünzen in sie einzuführen hat. Siebzig Jahre später genügt die kurze Anweisung: »Insert nickel« (Collins 1990: 106f.).

nikkonzeption: »Die Rede von technischen Normen als 'Verhaltensvorschriften' einer besonderen Art wäre trivial, wenn damit nur Vorschriften darüber gemeint wären, wie Maschinen zu konstruieren, zu produzieren, eventuell zu verwenden seien. Nicht-trivial, weil über 'definitorische Übungen' hinaus soziologisch konsequenzenreich und aus diesem Grund auch anstößig, ist dagegen der Vorschlag, gerätetechnische Normen als Verhaltensvorschriften zu interpretieren für das, was Geräte selbst tun, wie sie sich zu verhalten haben, ziemlich unabhängig von aktuellen menschlichen Eingriffen.« (Joerges 1989b: 250)

Wie hat man sich nun die verhaltensdeterminierende Wirkung von gerätetechnischen Normen konkret vorzustellen? Inwiefern steuert eine technische Norm wie 'max. 10 l Benzinverbrauch pro 100 km' das Verhalten eines Automotors – und tut sie das überhaupt? Joerges Ausführungen dazu sind insofern mißverständlich, als er nicht klar zwischen verschiedenen Ebenen – der physikalischen Ebene und jener der technischen Normen – unterscheidet. Denn genau genommen ist es die *physikalische* Beschaffenheit des Automotors – und nicht etwa eine technische Norm –, die sein Verhalten determiniert. Technische Normen und konkrete physikalische Prozesse bilden zwei verschiedene Beschreibungsebenen, die zu verwechseln in konzeptuelle Schwierigkeiten führt. Beide Ebenen sind jedoch systematisch aufeinander bezogen – zumindest solange ein Gerät funktioniert.

Einen Hinweis darauf, wie man sich den Zusammenhang zwischen physikalischer und 'normativer' Ebene vorstellen kann, gibt das Schichtenmodell der Informatik. Computer lassen sich in Termini einer hierarchischen Anordnung von Ebenen – oder eben 'Schichten' – beschreiben, die in einem eindeutigen Korrespondenz- bzw. Abbildungsverhältnis zueinander stehen. Sie sind, wie es Allen Newell formuliert, »alternative descriptions of the same physical beast« (Newell 1986: 35). Sehr vereinfacht ausgedrückt befindet sich ganz unten die *physikalische* Schicht der Transistoren, Dioden, Widerstände etc. (die sich ihrerseits wieder auflösen lassen bis hinunter zu den Kupferfäden und Siliziumkristallen und von da aus weiter zu den Atomen, Neutronen, Quarks usw.). Die elektrischen Spannungen der physikalischen Maschine lassen sich auf der nächsthöheren *logischen* Ebene in Form von logischen Schaltungen darstellen – und umgekehrt werden logische Funktionen durch Prozesse auf der physikalischen Ebene realisiert. Die Entitäten dieser logischen Ebene sind flip-flops, Gatter etc. Auf einer weiteren Ebene kann man das Verhalten des Computers in Termini der Operationen eines *ab-*

*strakten Rechners* beschreiben, der sich gewöhnlich zusammensetzt aus Rechenwerk, Steuerwerk und Speichereinheit. Es ist normalerweise diese Schicht, auf die Bezug genommen wird, wenn von der Hardware eines Computers oder von seiner Architektur die Rede ist. Den Abschluß schließlich bildet die Ebene der (höheren) *Programmiersprache* bzw. des Anwenderprogrammes. Mit der Ebene der Hardware ist sie über einen Compiler verbunden, der die Programmanweisungen in eine Sprache übersetzt, in die sog. Maschinensprache, die der abstrakte Rechner 'versteht'.[11]

Letztlich gibt es 'im' Computer keine Zahlen – und auch keine anderen Symbole. Es gibt nur elektrische Ströme und Spannungen. Doch von da aus lassen sich Schritt für Schritt höhere Beschreibungsebenen aufbauen, bis man schließlich bei jener Schicht angelangt ist, auf der man einen Befehl in natürlicher Sprache formulieren kann. »A deeper analysis shows«, so Terry Winograd und Fernando Flores, an deren Darstellung des Schichtenmodells ich mich hier orientiert habe, »that the number itself is not an object in the computer, but that some pattern of impulses or electrical states in turn *represents* the number. One of the properties unique to the digital computer is the possibility of constructing systems that cascade levels of representation one on top of another to great depth.« (Winograd/Flores 1986: 86f.)

Diese Schichtenorganisation hat den bekannten Effekt, daß man auf einer beliebigen Ebene operieren kann, ohne ständig daran denken zu müssen, was auf den unteren Ebenen geschieht. Wer ein Programm schreibt, kann dies tun »without any notion of (...) how that program will be converted into a sequence of instructions for the abstract machine, how those will be interpreted as sequences of instructions in micro-code, how those in turn cause the switching of logic circuits, or how those are implemented using physical properties of electronic components. Theoretically, the machine as structured at any one of these levels could be replaced by a totally different one without affecting the behavior as seen at any higher level.« (Winograd/Flores 1986: 90) Was auf den unteren Ebenen geschieht, kann allerdings nur so lange vernachlässigt werden, wie der Computer funktioniert. Sobald irgendwo in der Darstellungshierarchie eine Störung auftritt (oder noch nicht behoben ist), müssen die

11 Das Ganze ist natürlich um einiges komplizierter, und es wären vor allem auch sehr viel mehr Schichten zu unterscheiden, wobei die Art und die Anzahl je nach Maschinendesign variiert; vgl. dazu die Darstellung und die Diagramme in Giloi 1981: 12ff., und etwas weniger technisch Newell 1986: 35f.; Winograd/Flores 1986: 86ff.

tieferliegenden Schichten in die Arbeit und Überlegung mit einbezogen werden.[12]

Diese in der Informatik entwickelte Idee, einen Computer in Termini einer hierarchischen Anordnung von Ebenen – oder eben 'Schichten' – aufzubauen, läßt sich im Prinzip auch auf andere technische Artefakte übertragen. Die gerätetechnischen Normen, von denen Joerges spricht, repräsentieren eine – bereits sehr abstrakte – Beschreibungsebene, die allerdings, ähnlich wie es das Schichtenmodell der Informatik postuliert, einen systematischen Bezug aufweist zur physikalischen Ebene.[13] Geräte sind so konstruiert und eingestellt, daß sie den technischen Normen entsprechen – z.B. der Norm 'max. 10 l Benzinverbrauch pro 100 km'. Das ist der Grund dafür, weshalb man, wie Joerges es tut, ihr Verhalten auf der Ebene der technischen Normen beschreiben und davon absehen kann, was auf den tieferliegenden Ebenen geschieht. Eine solche Erklärungsstrategie ist allerdings nur so lange adäquat, als das Gerät auch 'normgerecht' funktioniert. Sobald der Motor 30 l Benzin verbraucht anstatt der erwarteten 10 l, läßt sich ganz offensichtlich nicht mehr davon sprechen, daß sein Verhalten durch die gerätetechnische Normen 'max. 10 l Benzin pro 100 km' gesteuert ist. In diesem Fall wird man, um sein Fehlverhalten zu erklären, auf eine tiefere Schicht Bezug nehmen, zunächst auf die funktionale und später vielleicht sogar auf die physikalische. Ich werde in Zusammenhang mit der funktionalistischen Erklärungsstrategie noch einmal darauf zurückkommen (vgl. S. 255).

(2) Im Gegensatz zu Bernward Joerges stellt Karl H. Hörning nicht die Artefakte selbst, sondern – so der Titel eines Aufsatzes – den »Umgang mit den Dingen« in den Vordergrund, d.h. das *technikbezogene Handeln* (u.a. Hörning 1985; 1988; 1989). Max Weber hat bekanntlich soziales Handeln abgegrenzt von sinnhaftem Handeln und dieses von bloßem Sich-Verhalten. Während soziales Handeln in der Definition Webers sinnhaftes Handeln ist, das sich in seiner Ausrichtung auf das Handeln

---

12 Eine praktische Implikation dieser relativen Autonomie der einzelnen Schichten ist die Tatsache, daß dasselbe Programm auf ganz verschiedenen Maschinen laufen kann. Allen Newell hat dieses funktionalistische Prinzip folgendermaßen formuliert: »If I give you any specific system at any one of these levels, there is an indefinite number of different ways of realizing it further down the hierarchy. In this sense each level appears to have an autonomous description.« (Newell 1986: 36) Wie diese Schichtenhierarchie praktisch realisiert wird, beschreibt Tracy Kidder 1984 sehr anschaulich in seinem Report über den Bau eines Computers.

13 Normen werden natürlich nicht beliebig gewählt. Daß man sich auf die Norm 220 V geeinigt hat (und nicht auf eine Norm 890 V), hat praktische Gründe.

anderer bezieht, zählt er zum sinnhaften Handeln jegliches Verhalten, mit dem die Handelnden einen subjektiven Sinn verbinden, ungeachtet welcher Art das Objekt ist, auf das sie sich in ihrem Handeln beziehen. Auch das Erklimmen eines Berges ist sinnhaftes Handeln, und das gilt erst recht für den Umgang mit einem technischen Artefakt. Dennoch besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen technikbezogenem Handeln und einem Handeln, das auf die natürliche Umwelt gerichtet ist, und es ist dieser Unterschied, der auch die Ambivalenz der Weberschen Technikkonzeption ausmacht.

Während die Vorgänge und Objekte der natürlichen Welt für Weber nur »'Daten' (sind), mit denen zu rechnen ist«, ohne jeglichen eigenen Sinngehalt, sind technische Artefakte in seinen Augen zwar »unbelebt«, aber keineswegs »sinn-fremd« (Weber 1921: 3). Als 'Fabrikate' sind sie das Produkt sinnhaften Handelns – die Intentionen und Orientierungen jener, die sie entwickelt haben, sind in ihnen gewissermaßen inkorporiert. Wer mit Geräten umgeht, muß ihren 'Sinn' im Prinzip deutend verstehen – »jedes Artefakt«, so Weber, »z.B. eine 'Maschine', ist lediglich aus dem Sinn deutbar und verständlich, den menschliches Handeln (...) der Herstellung und Verwendung dieses Artefaktes verlieh.« (Weber 1921: 3)[14] Technikbezogenes Handeln ist damit bei Weber mehr als nur sinnhaftes Handeln. Indem es sich in seiner Ausrichtung an den in Artefakten verfestigten Sinngehalten orientieren muß, weist es eine gewissermaßen 'soziale' Komponente auf.

Was bei Weber nur am Rande vermerkt wird, hat Alfred Schütz weiter ausformuliert: Technikbezogenes Handeln ist bei Schütz eine – freilich sehr asymmetrische – Form *sozialer Interaktion* (Schütz/Luckmann 1979: 102ff.). Herstellerin und Verwender eines Artefaktes gehen eine anonyme soziale Beziehung ein, indem die Herstellerin die Gebrauchsweisen des Verwenders antizipiert und bei ihrer Konstruktion in Rechnung stellt und jener die Intentionen der Herstellerin bis zu einem gewissen Grade entziffern muß, um das Artefakt sachgerecht zu verwenden. In der Sicht von Alfred Schütz, so Benno Werlen zusammenfassend, bringt der »Hervorbringer eines materiellen Artefaktes seinen subjektiven Sinn in diesem zur Persistenz und gibt ihn dem Benutzer zur Auslegung auf. Gleichzeitig

14 Weber hat 'Technik' bekanntlich sehr weit gefaßt. 'Technik' bezeichnet bei ihm nicht nur Sachtechnik, sondern auch methodische Verfahren wie etwa – so Webers buntgemischte Beispiele – Gebetstechnik, Technik der Askese, Erziehungstechnik, erotische Technik etc. (Weber 1921: 32). An dieser Stelle geht es aber nur um Technik als Sachtechnik.

wird aber auch der damit verbundene 'Zwangscharakter' der materiellen Artefakte zum Ausdruck gebracht: der Hervorbringer führt die Sinnsetzungen der Benutzer herbei, selbst dann, wenn er selbst nicht mehr anwesend ist und das Artefakt seine Stelle eingenommen hat. Die Welt der Artefakte wirkt damit sozialisierend und erhält eine wichtige Funktion in der Tradierung subjektiver Sinngehalte.« (Werlen 1987: 217)[15]

Damit ist gleichzeitig auch impliziert, daß durch das Artefakt selbst – bzw. durch den in ihm aufgehobenen 'Sinn' – weitgehend festlegt ist, wie es zu verwenden ist. Für einen regelgerechten Gebrauch hat die Verwenderin eines Artefaktes die vom Hersteller intendierten Funktionsprinzipien in Rechnung zu stellen und sich ihren Anforderungen anzupassen. Von da aus ist es dann nur noch ein kleiner Schritt bis hin zur These, daß Artefakte das Anschlußhandeln hochgradig normieren. Gerätetechnik, so Bernward Joerges Formulierung dieser These, »endet nicht bei Geräten, sondern setzt Handlungsanschlüsse voraus, die ähnlich normiert sind« (Joerges 1988: 35). In dieser Sicht ist technikbezogenes Handeln *formales* Handeln, ein Handeln mit anderen Worten, das vorgeschriebenen Regeln folgt – Regeln, die durch die Funktionsprinzipien der Geräte vorgegeben sind. Die Tätigkeiten, die erforderlich sind, um ein technisches Artefakt, eine Waschmaschine z.B., zu bedienen, spiegeln, so Joerges, »einerseits die Struktur der Geräte und müssen sich mit ihnen ändern; sie folgen andererseits, wenn auch eben nicht so starr, ähnlichen unpersönlich-formalisierten Ablaufprogrammen wie die Operationen der Geräte auch.« (Joerges 1988: 35)

Dieser formalistischen These setzt Karl H. Hörning eine kulturtheoretische Perspektive entgegen, die, wie er es nennt, auf dem »Eigensinn im Umgang mit Technik« beharrt (Hörning 1989: 104). Handeln ist deutungsabhängig, und das gilt auch für technikbezogenes Handeln. Die Art und Weise, wie ein technisches Artefakt gedeutet und wie mit ihm anschließend umgegangen wird, ist zwar nicht beliebig, aber auch nicht

15 Die Schützsche Konzeption von Technik und technikbezogenem Handeln ist offensichtlich nicht für alle Techniken gleich adäquat: Sie ist zugeschnitten auf isolierte technische Artefakte, auf 'klassische' Maschinen, aber nicht auf komplexe 'Große Technische Systeme', bei denen sich keine Herstellerintention mehr ausmachen läßt (vgl. Joerges 1988c). Tauglich ist sie jedoch vor allem für bestimmte Programme der Künstlichen Intelligenz, vor allem im Bereich der Wissensrepräsentation und hier besonders für Expertensysteme. Denn die Verwendung von Expertensystemen läßt sich tatsächlich als ein technisch vermittelter Kommunikationsprozeß zwischen Benutzer und Expertin verstehen (vgl. u.a. Collins 1987). Damit er funktioniert, müssen beide Seiten, wie bei jedem anderen Kommunikationsprozeß auch, über ein gemeinsames Wissen verfügen.

vollständig durch das Artefakt selbst determiniert: »Der Umgang mit Dingen ist zwar keinesfalls voraussetzungslos – ist doch schon zuviel an Ideen und Interessen in ihnen 'eingebaut', mit entsprechender handlungsbedingender Wirkung. Doch keinesfalls ist es so voraussetzungsvoll, daß nur noch (technisch, ökonomisch und sozial) vorgestanztes Anschlußhandeln stattfindet.« (Hörning 1989: 104) Technische Artefakte sind einerseits offen für verschiedene Bedeutungszuweisungen, und gleichzeitig sind sie die materiellen Träger von kulturellen Deutungen und Stereotypen. In der Formulierung von Hörning: »Eine solche (kulturtheoretische, B.H.) Perspektive betont nun erstens, daß technische Artefakte als Medien vielfältiger – nicht ausschließlich technisch-funktionaler – Sinnsetzungen begriffen werden müssen (...) (Und sie) betont zweitens, daß das technische Artefakt aber selbst kein neutrales Ding ist, dem je nach Zweck und Sinn unterschiedliche Bedeutungen zugeordnet werden können, sondern daß technische Geräte und Aggregate neben ihren technisch-funktionalen Inhalten selbst grundsätzlich auch 'Kulturobjekte', selbst codierte 'Bedeutungen' sind (...) Damit wird klar: Technik hat nicht nur eine kulturelle Seite, sondern Kultur hat auch eine materielle Seite.« (Hörning 1989: 99; 100)

Was Hörning hier sehr allgemein formuliert, daß nämlich der 'Umgang mit den Dingen' keineswegs immer eindeutigen und allgemeinen Regeln folgt, läßt sich von einer anderen Seite her noch etwas genauer fassen. Jeder Einsatz von Technik ist im Prinzip ein soziales Experiment. Die Interaktionseffekte, die auftreten können, wenn ein (neues) technisches Artefakt eingesetzt wird, und die Folgen, die es unter Umständen zeitigt, können niemals alle vorhergesehen werden. Es bleiben immer Lücken offen, Probleme, an die die Hersteller nicht gedacht haben und/oder die sich aufgrund von Kopplungseffekten ergeben – aufgrund der Vernetzung der Technik mit anderen technischen Artefakten, mit Menschen oder auch mit der Natur. So sind es genau diese nicht vorhersehbaren Interaktionseffekte mit der natürlichen Umwelt, die als gewichtiges Argument gegen gentechnologische Freisetzungsexperimente angeführt werden. Weil solche Lücken und Probleme erst mit der praktischen Anwendung einer Technik sichtbar werden (und vielleicht sogar erst in Form von Unfällen), bezeichnet Brian Wynne den Einsatz von Technik »as a form of social experiment on the grand scale« (Wynne 1988: 158).

Dies gilt nicht nur für neue Technologien. Auch der 'normale' Umgang mit Technik hat experimentellen, informellen Charakter und ist in hohem Maß vom jeweiligen Kontext geprägt, in dem er eingebettet ist.

Das ist die Grundthese von Brian Wynne, die er in seinem instruktiven Aufsatz an verschiedenen Beispielen illustriert. »Beneath a public image of rule-following behaviour, and the associated belief that accidents are due to deviation from those clear rules, experts are operating with far greater levels of ambiguity, needing to make uncertain judgements in less than clearly structured situations. The key point is that their judgements are not normally of the kind – how do we design, operate and maintain the system according to 'the' rules? Practices do not follow rules; rather, rules follow evolving practices.« (Wynne 1988: 153) Unfälle sind in dieser Sicht nicht Ausnahmen, sondern wie der Titel der Studie von Charles Perrow besagt, »normal accidents« – ganz 'gewöhnliche Katastrophen' (Perrow 1984). Häufig ergeben sie sich nicht, wie es vor allem die Begründungsform des 'menschlichen Versagens' nahelegt, aus Abweichungen von einer Regel, sondern aus unerwarteten Interaktionseffekten, die die Beteiligten vor Situationen stellen, vor *neue* Situationen, für deren Handhabung es eben gerade noch keine Regeln gibt.[16]

Ähnlich wie Wynne argumentieren auch Wolfgang Krohn, Johannes Weyer und Ralf Herbold (Krohn/Weyer 1989; Herbold u.a. 1991). Durch den praktischen Einsatz von Technik wird Wissen erzeugt, das anders nicht zu haben wäre. Wie sicher ein neues Flugzeug ist, kann letztlich nur die Praxis zeigen. Dieses Testen unter Realbedingungen ist der vorherrschende Modus der Wissenserzeugung bei Unikaten (Kernkraftwerke, Staudämme etc.), aber auch bei neuen Produktelinien. Die praktischen Erfahrungen, die man mit den Prototypen (eines neuen Flugzeugmodells beispielsweise) macht, lassen sich systematisch für Verbesserungen nutzen. Was alles geschehen könnte und was alles nicht funktio-

16 In Anlehnung an die entsprechende Unterscheidung in der Wissenschaftstheorie könnte man die Erforschung der informellen und kontextgebundenen Regeln des Technikgebrauchs als 'empirische' Techniksoziologie bezeichnen – im Gegensatz zu dem, zumindest unterschwellig, präskriptiv orientierten Technikmodell, wie es mir vor allem auch in der deutschen Techniksoziologie vorzuherrschen scheint. Aus Sicht der Argumentation von Brian Wynne ist die formalistische These nicht eine Beschreibung des *faktischen* Umgangs mit technischen Artefakten, sondern eine, wie es W.V.O. Quine bezogen auf die Wissenschaftstheorie genannt hat, 'rationale Rekonstruktion'. Was die neuere Wissenschaftssoziologie sich als Ziel gesetzt hat, nämlich eine *empirische* Epistemologie zu entwickeln, und was durch empirische Arbeiten wie etwa jene von Karin Knorr-Cetina praktisch eingelöst wurde, steht für die Techniksoziologie noch aus. Anstatt sich weiterhin am offiziellen Modell technikbezogenen Handelns zu orientieren, wäre im Rahmen von detaillierten Beobachtungsstudien – und auf ähnliche Weise wie in der Wissenschaftssoziologie – zu untersuchen, wie technische Artefakte, z.B. Programme, konkret erzeugt und in verschiedenen Kontexten praktisch und situativ verwendet werden.

niert, weiß man erst, wenn es passiert. »Das paradoxe Ergebnis ist: Je sicherer eine Technik sein soll, desto wichtiger werden Unfälle als Basis neuen Wissens.« (Krohn/Weyer 1988: 358) Unfälle sind Lernchancen. Das neue Wissen, das man durch sie gewinnt, kann für Verbesserungen genutzt und umgesetzt werden in Verhaltensregeln – nur ist damit keineswegs sichergestellt, daß diese auch für die nächste problematische Situation taugen.

Sicherheit bedingt nicht nur Funktionsfähigkeit in technischer Hinsicht, sondern hängt ganz entscheidend davon ab, ob man das Verhalten der beteiligten Akteure, der Piloten z.B., richtig eingeschätzt hat.[17] Die Erfindung eines technischen Artefaktes beinhaltet immer auch die Antizipation einer spezifischen Nutzungsform (vgl. Schütz). Genau diese kann aber im Labor nicht getestet werden, sondern setzt den praktischen Einsatz der Technik voraus. »Konstruiert wird durch den Technikerzeuger immer eine sozio-technische Verkopplung, die neben den im engeren Sinne instrumentellen Komponenten eine Reihe sozialer Komponenten enthält. Ein kleiner Teil dieser Verkopplungen ist in den Bedienungsanweisungen niedergelegt, der größere Teil besteht aus Vermutungen über die Art des Einsatzes und der Nutzung sowie über die möglichen bzw. erforderlichen Interaktionen mit anderen Artefakten und/oder Akteuren. Der erfolgreiche Abschluß des Erfindungsprozesses endet also nicht nur mit einem Ergebnis, sondern mit einer Hypothese über die Operationsweise einer neuen sozio-technischen Handlungsform. Diese Hypothese kann nur in seltenen Fällen unter kontrollierten Laborbedingungen geprüft werden, in keinem Fall aber ohne Einbeziehung von Interaktionen.« (Herbold u.a. 1991: 80) Artefakte werden nie isoliert in Betrieb gesetzt, sondern sind immer eingebettet in einen sozio-technischen Kontext, und es ist beides, Kontext *und* Artefakt, das die Handlungsanforderungen stellt. Je nach Kontext, in dem ein Artefakt verwendet wird, erfordert der Umgang mit ihm ein anderes Verhalten – und dies kann unter Umständen auch ein Verhalten sein, das sich nicht nur an den Bedienungsvorschriften, d.h. an allgemeinen und expliziten Regeln orientiert, sondern auf situative und soziale Gegebenheiten Rücksicht nimmt.[18]

---

17 Das französische Airbus-Unglück 1988 in Mulhouse ist ein Beispiel dafür (vgl. Herbold u.a. 1991).

18 Brian Wynne führt in diesem Zusammenhang den Transport von hochgiftigen Stoffen als Beispiel an. Wie damit umgegangen wird, ist weniger durch die allgemeinen (technischen) Sicherheitsvorschriften bestimmt als vielmehr durch die lokalen (sozialen) Produktivitätsnormen: »The local practical norms cross-cut the required norm of extremely careful and deliberate handling.« (Wynne 1988: 156)

(3) Während Karl H. Hörning und dezidierter noch Bernward Joerges eine 'Rückkehr zu den Sachen' fordern, ist es für Werner Rammert genau diese »Engführung auf Sachtechnik«, die sich einer soziologischen Betrachtung von Technik als Hindernis entgegenstellt (Rammert 1989a).[19] Die Probleme, die die Soziologie mit der Technik hat, beruhen in seinen Augen wesentlich auf (a) dem Vorherrschen eines materiellen Technikbegriffs, (b) der thematischen Konzentration auf den Umgang mit Dingen – unter Vernachlässigung des Umgangs mit Symbolen, und (c) der Analyse von Technik praktisch ausschließlich im Rahmen eines Zweck-Mittel-Schemas. Das Technische, so Rammert, »ist nicht in der Materialität der Artefakte zu suchen, sondern in der Funktionalität der Verknüpfung von sachlichen und nicht-sachlichen Elementen zu einem künstlichen Wirkzusammenhang« (Rammert 1989a: 133). Was das genau heißt, soll durch eine medientheoretische Konzeption von Technik deutlich gemacht werden, und dies setzt eine Unterscheidung voraus, die ich im Zusammenhang mit Turings 'algorithmischem' Maschinenbegriff bereits angesprochen habe – die Unterscheidung zwischen dem Mechanismus selbst und seiner praktisch-technischen Implementation. Oder wie es Rammert formuliert: »Es ist erst in zweiter Linie interessant, ob sich operationelle Transformationssysteme wie Algorithmen in physikalischen Sachsystemen oder in organischen Komplexen realisieren. Die Materialität bleibt zwar immer Voraussetzung solcher technischer Prozesse, da diese auf einen Träger angewiesen sind; der materielle Artefaktcharakter tritt jedoch in seiner Bedeutung weit hinter das funktionale Operationsschema zurück.« (Rammert 1989a: 134)

Entsprechend seiner Kritik an einem nur materiellen Technikbegriff stellt Rammert nicht die Technik selbst in den Vordergrund, sondern den Prozeß der *Technisierung*. Was ist damit gemeint? Technisierung meint bei Rammert zunächst einmal und sehr allgemein, daß Elemente aus einem gegebenen Zusammenhang herausgelöst und anschließend rekombiniert und in einen schematischen Ablauf gebracht werden. »In sachlicher Hinsicht handelt es sich«, so Rammert, »um die Konstruktion eines künstlichen Wirkzusammenhanges: Aus der konkreten Anschauung, aus dem natürlichen Vollzug von Handlungen und aus der Naturwüchsigkeit der Lebenswelt werden Elemente, wie Schemata, herausgelöst, und zu neuen Zusammenhängen kombiniert (...) In zeitlicher Hinsicht haben wir es mit der Fixierung von Abläufen zu tun (...) In sozialer Hinsicht geht

19 Vgl. auch Rammert 1988; 1989 b; 1990.

es um eine Mediatisierung von Sinn: Von den vielfältigen Verweisungsmöglichkeiten wird bei der Technisierung abgesehen, um diejenige des erfolgreichen Wirkens herauszuheben.« (Rammert 1989a: 156f.) Wie sich der Technisierungsprozeß konkret materialisiert und ob die Elemente Bausteine einer Maschine, mathematische Symbole oder Körperbewegungen sind, davon wird zunächst einmal abstrahiert. D.h. Rammert unterscheidet im Prinzip zwischen zwei Ebenen - zwischen der abstrakten Ebene der Technisierung auf der einen Seite und den Medien, in denen sich die Technisierung konkret vollzieht, auf der anderen. Entsprechend stellt sich ihm im Anschluß daran die Frage, »welche Phänomene als Medien in Frage kommen, in denen sich die Technisierung ausdrücken und in denen technische Formen gebildet werden können« (Rammert 1989a: 157).

Als Beispiele solcher Medien gibt Rammert eine theoretisch gesehen ausgesprochen heterogene Mischung an: Seine Liste reicht von physikalischen Medien (wie Sand oder Luft), über journalistische Medien (Presse, Radio und Fernsehen) und Kommunikationsmedien (Telephon, Telegraph) bis hin zu Luhmanns symbolisch generalisierten Kommunikationsmedien und endet schließlich bei »technologisch generalisierten Operationsmedien« (Rammert 1989a: 163). Aufschlußreicher als diese Beispiele sind die Definitionsmerkmale, die er am Beispiel der physikalischen Medien aufführt. Damit etwas als 'Medium' überhaupt infrage kommt, muß es auflösbar sein in einzelne Elemente, die sich auf beliebige Weise zu neuen Formen zusammensetzen lassen. Während Sprache, natürliche wie formale, für diesen Medienbegriff exemplarisch ist, fällt es ungleich schwerer einzusehen, inwiefern symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien (wie etwa Macht oder Liebe) diesen Kriterien entsprechen sollten.[20]

Für meinen Zusammenhang relevanter als diese meiner Ansicht nach nicht sehr instruktiven 'medientheoretischen' Ausführungen ist die bereits angesprochene sehr allgemeine Definition von 'Technisierung'. Von seiner Konstruktion her weist der Begriff der Technisierung eine gewisse – und vermutlich auch intendierte – Nähe auf zum Begriff des Kalküls in

20 Abgesehen davon wird auch nicht klar, wie sich Rammert nun tatsächlich den Zusammenhang zwischen 'Technisierung' und 'Medien' genau vorstellt. Da ist zwar zum einen die Rede davon, daß sich Technisierungsprozesse in Medien ausdrücken (Rammert 1989a: 157), an anderer Stelle wird Technik aber selbst als Medium – und speziell als Kommunikationsmedium – interpretiert (161), und an wieder anderer Stelle behauptet Rammert, daß »Medien Technisierung voraussetzen« (159).

der Mathematik (vgl. S. 54). Ähnlich wie im Rahmen eines formalen Systems Elemente definiert und gemäß einer Reihe von Regeln neu kombiniert und umgewandelt werden, definiert Rammert 'Technisierung' sehr abstrakt als einen Prozeß, bei dem Elemente aus ihrem ursprünglichen Zusammenhang herausgelöst und gemäß einer klaren Vorschrift neu zusammengefügt werden. Das Ergebnis kann eine Maschine sein, ein Kalkül oder auch eine Choreographie. Die Tillersche »Girlsmaschine« ist ein augenfälliges Beispiel dafür. So allgemein formuliert kommt der Begriff der 'Technisierung' ohne Bezugnahme auf die materielle Seite von Technik aus. »Die Technisierung ermöglicht«, so Rammert, »schrittweises Operieren mit idealisierten Einheiten und Neukombinieren von Möglichkeiten.« Woraus diese »idealisierten Einheiten« bestehen, ob es Symbole sind, Bewegungen oder die Bausteine einer Maschine, ist auf dieser abstrakten Ebene nicht von Bedeutung. »Im idealen Falle läßt sie sich (die Technisierung, B.H.) als Algorithmus einer geregelten Problemverarbeitung darstellen.« (Rammert 1989a: 155)

'Technisierung' wird also abstrakt definiert als ein Prozeß, bei dem Abläufe aus ihrem ursprünglichen Kontext herausgelöst, in ihre Bestandteile zerlegt und anschließend neu zusammengesetzt, d.h. gemäß einer Vorschrift in eine schematische Abfolge gebracht werden. 'Technisierung' findet folglich nicht nur bei der Konstruktion von technischen Artefakten statt. Auch Bewegungsabläufe können, wie Frederick W. Taylor propagiert hat und die »Girlsmaschine« anschaulich vorführt, in diesem Sinn 'technisiert', d.h. in elementare Operationen zerlegt und nach rationalen Gesichtspunkten neu zusammengesetzt werden, und das gleiche gilt auch für mentale Tätigkeiten. Algorithmen und Kalküle sind Ausdruck einer Technisierung im Bereich des Geistigen. Mit seinem Maschinenmodell hat Alan Turing diesem Prinzip eine radikale Deutung gegeben (vgl. Kap. 4).

Obschon eine solche abstrakte Sicht auf Technik in Rammerts Argumentation an sich angelegt wäre und seine Formulierungen dies auch stellenweise nahezulegen scheinen, wendet er sich dann doch gegen die damit verbundene Aufhebung der Differenz zwischen technisiertem menschlichem Handeln und maschineller Operation. Zwischen Mensch und Maschine, menschlichem Verhalten und maschinellem Prozeß besteht in den Augen von Rammert ein Unterschied grundsätzlicher Art. Im Gegensatz zur Operationsweise einer Maschine ist menschliches Handeln niemals vollständig berechenbar. Auch in extrem reglementierten Situationen – unter Handlungsbedingungen z.B., wie sie Max Weber mit dem

Begriff der 'rationalen Disziplinierung' beschrieben hat –, sind Menschen im Prinzip frei, sich Erwartungen bewußt zu widersetzen und aus Handlungszwängen auszuscheren. Im Gegensatz zu maschinellen Operationen handelt es sich, so Rammert, auch bei noch so technisierten menschlichen Handlungsroutinen »um soziale Prozesse, die immer der Kontingenz von Erwartungen und ihren Interpretationen unterliegen« (Rammert 1979a: 149f.). Während technisierte Abläufe in Maschinen unter allen Umständen »in ihrem programmierten Algorithmus« gefangen bleiben, unterliegen »technisierte Handlungen, z.B. Habitualisierungen und Arbeitsroutinen, weiterhin der Aneignung und Kontrolle von Handlungssubjekten, die ihre Verhaltensschemata jederzeit wieder aufgeben können« (Rammert 1989a: 156).

Was Rammert hier als Unterscheidungsmerkmal von Mensch und Maschine angibt – die Dimension der Kontingenz – gehört neben dem Intentionalitätsargument zu den Haupteinwänden, die gegen das Projekt der Künstlichen Intelligenz vorgebracht werden. Ob dieses Argument tatsächlich so stichhaltig ist wie es auf den ersten Blick erscheinen mag, soll in Kapitel 8 geprüft werden. Max Weber jedenfalls, der mit seinem Begriff des sozialen Handelns die theoretische Linie vorgezeichnet hat, an die Rammert und andere Vertreter des Kontingenzargumentes heute anschließen, hat zwischen maschineller Operation und technisiertem menschlichen Verhalten keinen so grundlegenden Unterschied zu sehen vermocht, zumindest nicht, wenn es um so reglementierte Handlungssituationen ging, wie man sie in den Fabriken seiner Zeit beobachten konnte (vgl. auch Kap. 4). Sofern man unter *Technik* ein »Verfahren nach zweckvoll gesetzten Regeln« verstehe, lasse sich dieser Begriff gleichermaßen anwenden für das »Zusammenwirken von Maschinenteilen« wie für das »Zusammenwirken gewaltsam zusammengekoppelter Zugpferde oder Sklaven oder endlich – dasjenige 'freier' menschlicher Arbeiter in einer Fabrik«. Das Verhalten einer Maschine erfolge »ganz in dem gleichen 'logischen' Sinne nach 'menschlich gesetzten Regeln'« wie dasjenige von Menschen in einem Zwangszusammenhang. Während das Zusammenspiel der Maschinenteile eine Funktion ihrer physikalischen und chemischen Qualitäten sei, ist es im Falle des Arbeiters »richtig kalkulierter '*psychischer* Zwang', – bewirkt durch den 'Gedanken' an die, im Falle des Abweichens von der 'Arbeitsordnung' geschlossene Tür der Fabrik, an den leeren Geldbeutel, die hungernde Familie usw.«, die ihn im »Gesamtmechanismus« festhalte (Weber 1907: 325).

Die Vorstellungen im Kopfe des Arbeiters und die Handlungsalternativen, die ihm offen stehen, werden »vom Fabrikanten durchaus in der gleichen Art als kausale Bestimmungsgründe des Zusammenwirkens der menschlichen Muskelkräfte im technischen Produktionsprozeß in Betracht gezogen, wie die Schwere, Härte, Elastizität und andre physikalische Qualitäten der Stoffe, welche die Maschinen zusammensetzen« (Weber 1907: 325). Daß dabei im Falle der Arbeiter »'Bewußtseinsvorgänge' in die Kausalkette eingeschoben sind« und bei den Maschinen nicht, macht, so Weber, »'logisch' auch nicht den allermindesten Unterschied aus« (Weber 1907: 326). In beiden Fällen ist das Verhalten berechenbar, bei den Arbeitern nicht minder als bei der Maschine, und es ist bis zu einem gewissen Grade auch steuerbar. Um sicher zu sein, daß die Arbeiter die Arbeitsordnung auch tatsächlich befolgen, braucht der Fabrikant nur dafür zu sorgen – mit Hilfe von Sanktionen und via »richtig kalkulierten 'psychischen Zwang'« –, daß sie keine anderen Alternativen haben. »Der Fabrikant setzt das Faktum, daß Leute vorhanden sind, welche Hunger haben und welche durch jene anderen Leute mit den Pickelhauben daran gehindert werden, ihre physische Kraft zu benützen, um die Mittel, die zur Stillung ihres Hungers dienen könnten, einfach da zu nehmen, wo sie zu finden sind (...) ganz ebenso in seine Rechnung ein, wie ein Jäger die Qualitäten seines Hundes. Und ebenso wie der Jäger darauf rechnet, daß der Hund auf seinen Pfiff in bestimmter Art reagiert (...), so der Fabrikant darauf, daß der Anschlag eines in bestimmter Art bedruckten Papiers ('Arbeitsordnung') einen gewissen Erfolg mehr oder minder sicher hervorbringt.« (Weber 1907: 326) Was Weber hier so anschaulich beschreibt, ist genau der Mechanismus, der der rationalen Disziplinierung zugrunde liegt. Rationale Disziplinierung ist eine Form der Verhaltensbestimmung, die über eine rigorose Einschränkung des Handlungsspielraums läuft und deren Wirksamkeit primär auf Sanktionen und (ökonomischem) Zwang beruht. Weil der Arbeiter keine Alternativen hat, fügt er sich, wie Weber schreibt, »jenem Mechanismus auch physisch ein« und vollzieht die verlangten »Muskelbewegungen« (Weber 1907: 325).

Die Verbindung, die Weber herstellt zwischen der Operationsweise einer Maschine und dem Verhalten von Menschen in stark reglementierten Handlungssituationen, ihre Austauschbarkeit auch, läßt sich auf der Basis von Turings Modell um einiges präziser fassen. Ich möchte seine Argumentation deshalb noch einmal kurz darstellen, vor allem auch mit Blick auf ihre Implikationen für die Techniksoziologie (vgl. auch Kap. 2).

(1) Turing hat die These formuliert, daß regelgeleitetes menschliches Handeln und die Operation einer Turingmaschine im Prinzip äquivalente Prozesse sind. Jedes Handeln, das einer klaren Vorschrift folgt, kann im Prinzip auch von einer Maschine durchgeführt, d.h. mechanisiert werden. Zwischen der 'Technisierung' von Handlungen (oder in anderer Terminologie: ihrer 'Formalisierung') und ihrer Mechanisierung gibt es keine prinzipielle Differenz. Das ist der Kernpunkt von Turings These.

(2) Die 'Maschine', die Turing in seinem Aufsatz einführt, ist ein Gedankenexperiment, mit dem er zu verdeutlichen suchte, was es heißt, einem Algorithmus zu folgen. Emil Post hat für den gleichen Zweck das nicht minder anschauliche Bild eines 'Fließbandarbeiters' gewählt. Beide Modelle sind funktional äquivalent. Was Turings Maschine tut, läßt sich genausogut durch den Postschen Fließbandarbeiter realisieren – und umgekehrt. Die 'Maschinenhaftigkeit' der Turingmaschine ist für die Argumentation nicht von Belang. Ob eine Maschine die einzelnen Schritte des Algorithmus ausführt oder ein Fließbandarbeiter, ändert nichts am Ablauf des Algorithmus und seinem Resultat.

(3) Turing hat in seinem psychologischen Modell zwei Varianten unterschieden – eine Zustandsvariante und eine Instruktionsvariante (vgl. S. 91). Im einen Fall ist der Algorithmus gewissermaßen im Gehirn inkorporiert, im anderen Fall liegt er in Form einer schriftlich formulierten Anweisung vor. Oder in der Formulierung von Andrew Hodges: »Turing offered two general models for 'definite methods' (=Algorithmen, B.H.), and argued that each could be modeled by the Turing machine. One was that of a person following a procedure, definite in the sense that at every stage a completely explicit 'note of instructions' could be written down explaining what was to be done in such a way that another person could take up the work (...) According to (another) argument no explicit description of the process being followed need be given; it sufficed that the process was in some way embodied in the internal structure of the mind.« (Hodges 1988: 4) In welcher Variante man den algorithmischen Prozeß konzeptualisiert, ob in der Instruktions- oder der Zustandsvariante, spielt für die Anwendbarkeit von Turings These keine Rolle.

(4) Die Argumentation von Turing ist rein theoretisch und völlig unabhängig von der konkreten Beschaffenheit der Maschine, deren Grunddesign er in seinem Aufsatz beschreibt. Ein und dieselbe Turingmaschine kann auf beliebig viele Arten physikalisch realisiert sein – sie kann, so Wolfgang Stegmüllers plastische Formulierung, »aus elektronischen Elementen bestehen; sie kann rein mechanisch mit Hilfe von Zahnrädern u.

dgl. aufgebaut sein; sie kann sogar aus Pappkarton bestehen; und warum nicht aus Menschen oder dressierten höheren Tieren, die dazu abgerichtet sind, gewisse Handgriffe zu verrichten?« (Stegmüller 1987: 405) Wie auch immer Turings Maschine gerätetechnisch verwirklicht ist, ob sie aus 'Fleisch und Blut', aus Zahnrädern oder elektronischen Elementen besteht, tangiert die Gültigkeit seiner Schlußfolgerungen nicht. Turings These gilt immer – unabhängig davon, wie seine 'Maschine' praktisch verwirklicht ist.

(5) Wenn regelgeleitetes menschliches Handeln und die Operation einer Turingmaschine tatsächlich äquivalente Prozesse sind, dann ergibt sich daraus als Implikation, daß das Befolgen eines Algorithmus offenbar nicht an ein bestimmtes materielles Substrat gebunden ist. »Mental processes are correctly described in the logical model independently of the particular physical embodiment, and so can be embodied in a physical form other than the brain« – z.B. in einem elektronischen Computer (Hodges 1988: 9). Der physikalische Träger eines algorithmischen Prozesses, sein materielles Substrat, können Transistoren sein, Relais oder die Nervenzellen des menschlichen Gehirns. Die physikalische Beschaffenheit, der 'stuff', hat keine kausale Wirkung. So jedenfalls stellt sich die Beziehung zwischen Körper und Geist aus der Perspektive des *Funktionalismus* dar. Die Grundüberlegung dazu stammt von Turing. Auf seinem Weg zu einer anerkannten Lehre hat sich der Turing-Funktionalismus zwar in ein Bündel von Thesen und Ideen aufgefächert, als gemeinsames Merkmal ist ihm jedoch ein strikter Anti-Reduktionismus geblieben.

Der Begriff 'Funktionalismus' bezeichnet zunächst einmal eine nichtreduktive *Erklärungsstrategie*, die Phänomene, natürlicher oder künstlicher Art, in Termini ihrer funktionalen Organisation zu erklären sucht anstatt unter Bezugnahme auf die physikalische Ebene. Der Funktionalismus wendet sich gegen die (verbreitete) physikalistische Annahme, daß alles Materielle letztlich auch eine physikalische Erklärung haben muß – »that if something is made of matter, its behavior must have a physical explanation« (Putnam 1975a: 296). Kritik am physikalischen Erklärungsmodell ist jedoch nicht gleichbedeutend mit einer anti-materialistischen Position. Wer für eine funktionale Erklärung votiert, negiert nicht, daß natürliche wie künstliche Objekte materielle Gebilde sind, die den Gesetzen der Physik gehorchen. Er führt nur eine andere, 'höhere' Beschreibungs- und Erklärungsebene ein – eben jene der *funktionalen Organisation*. Eine funktionale Erklärung zeichnet sich, so Daniel C.

Dennett, dadurch aus, »that we make predictions solely from knowledge or assumptions about the system's functional design, irrespective of the physical constitution or condition of the innards of the particular object« (Dennett 1971: 4).

Worin sich eine funktionale von einer physikalischen Erklärung unterscheidet, macht Hilary Putnam an einem einfachen Beispiel deutlich (Putnam 1975a: 295ff.). Man stelle sich vor, man habe einen Holzpflock vor sich und ein Brett mit zwei Löchern, eines ist rund, das andere quadratisch. Der Pflock paßt nur ins quadratische Loch, nicht aber ins runde. Wie läßt sich das erklären? Im Rahmen einer physikalischen Erklärung würde man mit der atomaren Struktur von Holz argumentieren und vielleicht sogar die Gesetze der Teilchenphysik bemühen, um zu erklären, weshalb der Pflock nicht ins runde Loch paßt. Um einiges weniger aufwendig ist eine Erklärung, die nicht auf die physikalische Ebene Bezug nimmt, sondern auf einer höheren Ebene ansetzt. Weshalb der Pflock nur ins quadratische Loch paßt, läßt sich sehr viel einfacher mit den geometrischen Eigenschaften bzw. den jeweiligen Durchmessern von Pflock und Loch erklären. Bei dieser Erklärung spielt es keine Rolle, aus welchen Materialien das Brett und der Pflock gemacht sind – »the same explanation will go in any world (whatever the microstructure) in which those higher level structural features are present. In that sense this explanation is *autonomous*.« (Putnam 1975a: 296)[21]

In Putnams Beispiel bleibt allerdings etwas unerwähnt, was gewöhnlich ein wesentliches Element einer funktionalen Erklärung ist – das Element der Finalität. Im Rahmen einer funktionalen Erklärung wird das Verhalten eines Phänomens, und das gilt insbesondere für *künstliche* Objekte, für Artefakte, in Termini des Zusammenspiels von Zwecksetzung und funktionaler Organisation erklärt (Simon 1988). Eine funktionale Erklärung dieser Art setzt allerdings voraus, daß das Artefakt relativ zu seiner Funktion richtig konstruiert ist. Die Materialien, aus denen es besteht, die Verbindungen zwischen den einzelnen Teilen, ihre Form etc., müssen so gewählt sein, daß sie von ihren physikalischen und chemischen Qualitäten her die Zwecksetzung des Artefaktes erfüllen. Nur unter dieser Bedingung ist es möglich, bei der Erklärung von der physikalischen Ebene abzusehen.[22]

---

21 Die einzige Bedingung ist die, daß die Materialien nicht dehnbar sind.

22 Und umgekehrt wird man, sobald ein Artefakt nicht mehr funktioniert, die funktionale Erklärung aufgeben und auf die physikalische Ebene rekurrieren. Die Gründe dafür, weshalb eine Brücke zusammengebrochen ist, sucht man gewöhnlich nicht in

Funktionale Erklärungen sind verbreitet, im Alltagsleben und in der Wissenschaft. Turing hat dem funktionalen Erklärungsmodell eine spezifische Wendung gegeben, und diese ist gewöhnlich gemeint, wenn man von 'Funktionalismus' spricht. In diesem engeren Sinne bezeichnet 'Funktionalismus' ein bestimmtes *Modell des Geistigen*, das auf der Annahme beruht, daß mentale Zustände funktionale Zustände sind, die physikalisch auf ganz verschiedene Weise verwirklicht sein können (Block 1978; Bieri 1981: 47ff.; Hastedt 1988: 142ff.). Der Funktionalismus in diesem Sinn richtet sich, so Hilary Putnam, gegen den verbreiteten Glauben, daß »unsere Hardware das Wesen unseres Bewußtseins« ist. Er ist eine »Reaktion gegen die Vorstellung, daß unsere Materie wichtiger sei als unsere Funktion, daß unser *Was* wichtiger sei als unser *Wie*« (Putnam 1991: 13). Mit seinem Maschinenmodell hat Turing vorgeführt, daß sich kognitive Prozesse ohne Bezugnahme auf das physikalische Substrat beschreiben lassen, in dem sie realisiert sind. Damit hat er der Diskussion rund um die klassisch-cartesische Frage: »Are we made of matter or of soul-stuff?" (Putnam 1975a: 291) eine neue *Beschreibungsebene* gegeben – eine Ebene, auf der kognitive Prozesse in Termini von funktionalen Zuständen analysiert anstatt in neurophysiologischen Begriffen beschrieben werden. »Wir interessieren uns nicht für die Tatsache, daß das Gehirn die Konsistenz von kaltem Porridge hat«, so Turings deftige Formulierung der funktionalistischen These. »Wir wollen nicht sagen, 'Diese Maschine ist ziemlich hart, darum ist sie kein Gehirn und kann nicht denken'.« (Zit. in Hodges 1989: 484) Im Rahmen einer funktionalen Erklärung wird davon abstrahiert, aus welchem Stoff ein 'Ding' gemacht ist. Ob das 'physikalische Symbolsystem' (Newell/Simon), dessen Verhalten man beschreiben will, aus Vakuumröhren besteht, aus Transistoren oder aus Nervenzellen, ist für die Erklärung nicht von Belang.

So formuliert meint 'Funktionalismus' zunächst einmal nur ein *methodisches Prinzip*: »Functionalism in this sense is a doctrine about the nature of psychological explanation, not a doctrine about what mental states are.« (Block 1978: 262) Turing hat in seiner Arbeit jedoch noch eine andere, radikalere Bedeutungsvariante von 'Funktionalismus' formuliert. In dieser härteren Fassung wird das methodische Prinzip des 'methodologischen Funktionalismus' (Hastedt) zu einer *ontologischen* These

---

ihrer funktionalen Organisation, sondern in den physikalischen Eigenschaften der Materialien, aus denen sie gebaut ist.

verdichtet: mentale Zustände *sind* funktionale Zustände. Entsprechend lassen sie sich in verschiedenen physikalischen Substraten praktisch realisieren. Das menschliche Gehirn ist nur eine Möglichkeit unter vielen. Dieselbe Abfolge von mentalen Zuständen – dasselbe 'Programm' gewissermaßen – kann aus der Sicht des 'metaphysischen Funktionalismus' (Hastedt) implementiert sein in Computern, menschlichen Gehirnen oder – ein beliebtes Gedankenexperiment der Cognitive Science – in den Bewohnern anderer Planeten. Mensch, Computer und die Bewohnerinnen des Saturns unterscheiden sich wohl in ihrer 'Substanz', doch diese Differenz ist in funktionalistischer Sicht nicht von Bedeutung: »We could be made of Swiss cheese, and it wouldn't matter.« (Putnam 1975a: 291)

Diese Überlegungen, und insbesondere die Annahme, daß derselbe algorithmische Ablauf auf verschiedene Weise und in verschiedenen Medien praktisch realisiert sein kann, lassen sich auch für die Techniksoziologie nutzbar machen. Aus der Sicht des Turingmodells sind menschliches Handeln nach Vorschrift und die Operation einer Turingmaschine funktional äquivalente Prozesse. Jedes Verhalten, das einer klaren Regel folgt, kann im Prinzip auch mechanisiert werden. Zwischen einem 'algorithmisierten' menschlichen Handeln und seiner maschinellen Durchführung besteht keine grundlegende Differenz. Wenn es aber theoretisch gesehen nicht von Bedeutung ist, auf welche Weise ein Algorithmus konkret realisiert ist, ob er von einem Menschen ausgeführt wird oder von einer Maschine, dann geht damit auch eine Bedeutungsverschiebung im Begriff des 'Technischen' einher. Das Entscheidende am Technischen ist dann nicht die Maschinerie, sondern das Algorithmische. 'Maschinenmäßig' ist in dieser Sicht alles, was nach einer klaren Vorschrift abläuft - unabhängig davon, wie es konkret implementiert ist (vgl. Bammé u.a. 1983).

Gegenstand der Techniksoziologie sind so gesehen nicht technische Artefakte konkreter Art wie etwa Werkzeuge, Geräte, Maschinen, Apparate oder automatische Anlagen, sondern *algorithmische Prozesse*. Im einen Fall sind sie durch Menschen realisiert, im anderen Fall durch Maschinen. Auch das mechanische Verhalten von Fließbandarbeitern in einer Fabrik gehört zum Gegenstandsbereich der Techniksoziologie, nicht nur die Maschinen, an denen sie arbeiten. Zumal, wie die Turingthese theoretisch besagt und die Computerisierung uns täglich praktisch vor

Augen führt, Menschen, die rein mechanische Arbeit leisten, problemlos durch Maschinen ersetzbar sind – »wherever we choose to mimic a thing, a thing can mimic us«, so H.M. Collins pointierte Formulierung dieses Zusammenhanges (Collins 1990: 216).

Damit ist natürlich nicht behauptet, daß alle möglichen Realisierungen eines Algorithmus auch *praktisch* äquivalent sind. Bekanntlich erachtet man es in der Regel als vorteilhafter, Maschinen einzusetzen anstatt Menschen, und auch die möglichen maschinellen Realisierungen sind, wie wir wissen, keineswegs gleichwertig. Diese faktische Differenz ist aber kein prinzipieller Einwand gegen die vorgeschlagene Begriffsbestimmung. Im Gegenteil. Denn erst auf dem Hintergrund einer solchen abstrakten Definition macht es Sinn nach den konkreten Mechanismen zu fragen, die für den faktischen Selektionsprozeß verantwortlich sind.

Ein anderer möglicher Einwand betrifft die Reichweite des vorgeschlagenen Technikbegriff. Gilt diese Definition nur für die 'Hochtechnologien' (Rammert 1992) oder schließt sie auch die Artefakte der klassischen Maschinentechnik mit ein? Ähnlich wie der methodologische Funktionalismus beinhaltet der vorgeschlagene Technikbegriff nur ein methodisches Prinzip. Er macht keine Aussagen darüber, was technische Artefakte 'sind', sondern behauptet nur, daß nicht die Materialität eines Artefaktes die angemessene Beschreibungsebene ist, sondern die funktionale Organisation. Alles was sich in Termini eines algorithmisches Prozesses *beschreiben* läßt, fällt unter diesen Technikbegriff. Für welche Artefakte bzw. technischen Systeme dies im einzelnen gilt, läßt sich nicht generell beantworten – obschon die neuen Informationstechniken dafür vermutlich die besseren Kandidaten sind.[23]

Wie mein knappes Resumé der techniksoziologischen Diskussion jedoch gezeigt hat, wird das Technische – allen gegenteiligen Beteuerungen zum Trotz – immer noch vorzugsweise als das konkret Maschinelle definiert. Diese essentialistische Bestimmung hat sich gehalten, obschon – wie nicht zuletzt auch der schillernde Begriff des 'technologischen Systems' deutlich macht (u.a. Hughes 1987) –, es immer schwieriger wird, die Grenze zwischen dem Menschlich-Mechanischen und dem Maschinel-

23 In eine ähnliche Richtung weist auch die Maschinendefinition von Bammé u.a. 1983. Im Gegensatz zur 'klassischen' Maschine, bei der Algorithmus und materielle Beschaffenheit zusammenfallen, zeichnet sich die 'transklassische' Maschine dadurch aus, daß dieselbe formale Struktur auf verschiedene Arten technisch realisiert sein kann. Dies impliziert – zumindest für die Klasse der 'transklassischen' Maschinen –, daß sie nicht mehr über ihre materielle Gestalt, sondern über den in ihnen inkorporierten Algorithmus definiert werden (vgl. insb. S. 108ff.).

len präzise zu ziehen. Es gibt jedoch Argumente anderer Art, die gegen eine solche Gleichsetzung von Mensch und Maschine sprechen könnten – Argumente wie sie vor allem in der Diskussion rund um die Künstliche Intelligenz entwickelt wurden. Von ihr und von ihnen handelt das folgende Kapitel.

Kapitel 8
# Die Grenzen maschineller Intelligenz

allgemeine hypothese
das wichtigste geschöpf auf erden ist der mensch

*Konrad Bayer*[1]

We will, in short, divide beings, all of whom behave in the same way, into two classes, calling 'men' those which are in principle within our powers to love, and calling 'machines' those which we cannot possibly love.

*Paul Weiss*[2]

## 1. Maschinelle Intelligenz im Test

Als Entstehungsjahr der 'Künstlichen Intelligenz' wird normalerweise das Jahr 1956 angegeben. Damals trafen sich eine Reihe von zumeist jüngeren Wissenschaftlern auf dem Campus des Dartmouth College und formulierten gemeinsam ein ambitiöses Forschungsprogramm, dem John MacCarthy den Namen *Artificial Intelligence* gab. So will es zumindest die Hagiographie der Künstlichen Intelligenz.[3] Streng genommen müßte man das Entstehungsjahr der Künstlichen Intelligenz aber 20 Jahre vordatieren, ins Jahr 1936, als Alan Turing seine berühmte These formu-

1 Bayer 1985, II: 72.

2 Weiss 1961: 196.

3 Zur Entwicklung und Geschichte der Künstlichen Intelligenz gibt es eine Reihe von Studien; vgl. u.a. J. Fleck 1982; Gardner 1985, insb. Kap. 6; Schopman 1987 sowie (ausgesprochen affirmativ) McCorduck 1979. Eine einhellige Definition der 'Künstlichen Intelligenz' gibt es bislang nicht. Je nachdem werden zwei verschiedene Aspekte hervorgehoben: (1) KI ist die Entwicklung von Programmen zur Bearbeitung von Problemen, deren Lösung bei Menschen Intelligenz voraussetzt. (2) KI ist die Erforschung menschlicher Intelligenz mit Hilfe von Computermodellen. Oder in der Formulierung von Margaret Boden: »By 'artificial intelligence' I mean the use of computer programs and programming techniques to cast light on the principles of intelligence in general and human thought in particular.« (Boden 1987: 5) Im einen Fall wird die Künstliche Intelligenz eher der Informatik zugerechnet, im anderen Fall eher der Psychologie. Die Künstliche Intelligenz selbst umfaßt verschiedene Teilgebiete und Forschungsschwerpunkte, u.a. Wissensrepräsentation, automatisches Beweisen, Computervision und Mustererkennung, Robotik und Expertensysteme. Zur Künstlichen Intelligenz gibt es eine breite, auch nicht-technische Literatur; vgl. vor allem Boden 1987 sowie als neuere Darstellung Becker 1991.

lierte. Mit dieser These hat Turing – ohne es damals freilich zu wissen – das theoretische Fundament für die Cognitive Science gelegt.[4] Damals lösten seine Überlegungen allerdings noch keinerlei Aufregung aus. Das änderte sich, als Turings 'Papiermaschine' in den 40er Jahren konkrete Gestalt annahm (vgl. Kap. 6). Mit dem Aufkommen von Maschinen, die imstande waren zu tun, was bis anhin nur von Menschen getan werden konnte – komplizierte Gleichungen lösen, Dame spielen, Denksportaufgaben lösen –, wurde in den Augen der damaligen Beobachter die traditionelle Abgrenzung von Mensch und Maschine brüchig. Die hergebrachten Definitionskriterien, von welcher philosophischen Tradition auch immer inspiriert, schienen jedenfalls nicht mehr brauchbar zu sein, um den Menschen von dieser neuen Maschine abzugrenzen.

Die Arbeiten, die in diesen frühen Jahren zu diesem Thema publiziert wurden, zeugen von der Schwierigkeit, mit diesem neuen technischen Phänomen und seinen Implikationen zu Rande zu kommen. Der *Diskurs* um die Künstliche Intelligenz begann jedenfalls einige Jahre, bevor sie in Dartmouth offiziell begründet wurde, und wie es scheint, fand er vor allem in England statt.[5] Maschinen sind nicht lebendig, befand etwa Michael Scriven 1953, folglich können sie auch kein Bewußtsein haben. Und wenn es gelänge, eine Maschine aus organischem Material zu bauen, dann wäre sie keine Maschine mehr (Scriven 1953). Der Neurologe Geoffrey Jefferson verortete die Differenz eher im emotionalen Bereich: Solange eine Maschine nicht Freude empfinden kann, wenn sie ein Gedicht schreibt, und Trauer, wenn ihre Röhren durchbrennen, verbiete es sich, ihr menschliche Qualitäten zuzuschreiben (Jefferson 1949, zit. in: Hodges 1989: 467). Der Kybernetiker D.M. MacKay konnte dagegen keine prinzipielle Differenz sehen zwischen dem Verhalten des mensch-

4 Der Begriff 'Cognitive Science' wird in der Regel als Sammelbegriff für eine Reihe von Spezialdisziplinen verwendet, wozu neben der Linguistik und den Neurowissenschaften auch die Künstliche Intelligenz gehört. Insofern ist die Cognitive Science auch nicht durch einen bestimmten Gegenstand konstituiert, sondern durch eine theoretische Perspektive, die interdisziplinäre Gültigkeit für sich beansprucht. Im Deutschen wird 'Cognitive Science' entweder mit 'Kognitionswissenschaft' oder mit 'kognitiver Wissenschaft' übersetzt. Da sich noch kein einhelliger Sprachgebrauch durchgesetzt hat, verwende ich im folgenden den englischen Ausdruck. Zur Entwicklung der Cognitive Science vgl. Gardner 1985; Varela 1990; sowie der von Dieter Münch herausgegebene Sammelband, in dem viele einschlägige Texte zusammengestellt sind (Münch 1992).

5 Frühe Zusammenstellungen dieser Debatte, die Ende der 40er Jahre ihren Anfang nahm und vor allem in den Zeitschriften *Mind*, *Analysis* und dem *British Journal for the Philosophy of Science* ausgetragen wurde, sind Anderson 1964 sowie Hook 1960, insb. Teil 2.

lichen Gehirns und dem Verhalten eines entsprechend konstruierten Artefakts. Es sei durchaus möglich, eine Maschine zu bauen, die zu zielgerichtetem und auch unvorhersagbarem Verhalten fähig sei (MacKay 1951). Damit vertrat er freilich keine Mehrheitsposition. Denn bereits zu dieser Zeit war das Kontingenzargument ein verbreiteter Einwand gegen die Vorstellung 'denkender' Maschinen. Um die These, daß die prinzipielle Kontingenz des menschlichen Handelns das Hauptmerkmal der Mensch/Maschine-Differenz sei, zu plausibilisieren, präsentierte Jonathan Cohen 1955 ein (in verschiedener Hinsicht) aufschlußreiches Gedankenexperiment. Wird ein Kybernetiker je in der Lage sein, das nachmittägliche Verhalten seiner Ehefrau in gleicher Weise vorherzusagen wie dasjenige seines Computers? 'Nein', meint Cohen. Er mag sich zwar auch beim Computer täuschen, aber der Grund dafür ist ein anderer. Im einen Fall hat er sich in seinen Vorannahmen und Berechnungen geirrt, im Falle der Gattin nützt ihm sein ganzes Vorwissen nichts: »There may often be times when no amount of prior reasoning would prevent him from being surprised at his wife's behaviour«, so Cohens erfahrungsgesättigtes Fazit.[6] Erst wenn es ihm gelänge, das Gehirn seiner Gattin zu öffnen und daran zu ändern, was ihm gefällt, wäre ihr Verhalten auf ähnliche Weise berechenbar wie jenes der Maschine. Doch dann, so Cohen lakonisch, »we should say that his wife had no mind of her own« (Cohen 1955: 40).

In diese Debatte griff Alan Turing schon sehr früh mit einem für die damaligen Verhältnisse reichlich polemischen Aufsatz ein, den er 1950 in der Zeitschrift *Mind* veröffentlichte (Turing 1950). Turing war der Ansicht, daß die Frage nach der Denkfähigkeit von Maschinen eine uferlose Diskussion nach sich zieht. Denn: Was heißt 'denken'? Und wie entscheiden wir, ob jemand denkt, sei es nun ein Mensch oder eine Maschine? Turing ersetzte deshalb die mentalistische Frage: 'Können Computer denken?' durch eine – zumindest auf den ersten Blick – behavioristische: Sind Computer denkbar, die sich in ihrem *Verhalten* nicht von einem Menschen unterscheiden? So umformuliert läßt sich die ursprüngliche Frage auf ein Experiment abbilden, das Turing 'Imitationsspiel' nannte.

Man setzt einen Computer in ein Zimmer, einen Menschen in ein anderes und verbindet beide über einen Fernschreiber mit einem Fragesteller, der ihnen beliebige Fragen stellen kann. Etwa: »Welches Gedicht

---

6 Das müssen mitunter auch Gattinnen schmerzlich erfahren: »'Ich mag gar keinen Pflaumenkuchen', erklärt der Mann seiner überraschten Frau an seinem 57. Geburtstag im 31. Jahr seiner Ehe«, so Luhmanns unübertroffenes Beispiel für die Wiedereinführung doppelter Kontingenz (Luhmann 1984: 474).

mögen Sie am liebsten?« »Multiplizieren Sie bitte 543 mit 17.« »Wo waren Sie dieses Jahr im Urlaub?« Anhand der Antworten hat der Fragesteller herauszufinden, welche Antworten von einer Maschine stammen und welche von einem Menschen. Gelingt es ihm nicht, die Antworten richtig zuzuordnen, hält er den Computer für einen Menschen oder umgekehrt den Menschen für eine Maschine, dann hat die Maschine das Imitationsspiel gewonnen. Die Frage: Können Maschinen denken? muß fairerweise positiv beantwortet werden.

So oder ähnlich wird normalerweise die Versuchsanordnung von Turings Imitationsspiel beschrieben. Tatsächlich schlägt Turing aber zunächst ein Spiel mit ganz anderen Protagonisten vor: »The game is played with three people, a man (A), a woman (B), and an interrogator (C) who may be of either sex. The interrogator stays in a room apart from the other two. The object of the game for the interrogator is to determine which of the other two is the man and which is the woman.« (Turing 1950: 5) A's Aufgabe in diesem Spiel besteht darin, den Fragesteller zu einer falschen Identifizierung zu verleiten, während B ihm soweit als möglich helfen soll. A wird also so tun, als ob er eine Frau wäre, während B sich ganz natürlich, »wahrheitsgemäß«, wie Turing schreibt, verhalten wird. Anhand der Antworten hat der Fragesteller herauszufinden, wer von den beiden ein Mann ist und wer eine Frau. Was aber passiert, wenn er sich irrt? Wenn er den Mann für eine Frau hält? Ist ein Mann, der für eine Frau gehalten wird, immer noch ein Mann? Oder ist er eine Frau? Oder etwas Drittes?

In der Literatur zum Turingtest wird diese erste Variante des Imitationsspiels meistens übergangen oder als exzentrisches Vorspiel abgetan. Obschon viele Interpreten des Turingtests konzedieren, daß man eine Maschine, die menschliches Verhalten perfekt imitiert, fairerweise als intelligent bezeichnen muß, scheuen sie davor zurück, diese Überlegung auch auf das 'Geschlechterspiel' zu übertragen: Einer Maschine, die sich in ihrem Verhalten nicht von einem Menschen unterscheidet, werden menschliche Qualitäten attestiert; ein Mann, der weibliches Verhalten perfekt simuliert, bleibt immer noch ein Mann. In den Augen von Andrew Hodges ist das Geschlechterspiel nur eine »Finte«, denn eine erfolgreiche Imitation hätte keinerlei Aussagekraft: Das Geschlecht hängt, so Hodges, von »Fakten ab, die nicht auf Symbolsequenzen reduzierbar« sind (Hodges 1989: 480). Geschlechtszugehörigkeit ist eine Naturtatsache. Sein Geschlecht hat man und man behält es, wie auch immer man sich verhält.

Die Pointe von Turings Geschlechterspiel erschließt sich aber erst dann, wenn man auf einen naturalistischen Begriff von Geschlecht verzichtet und statt dessen Geschlechtszugehörigkeit als Resultat eines Darstellungs- und Zuweisungsprozesses versteht. Candace West und Don H. Zimmerman sprechen in diesem Zusammenhang treffend von 'doing gender' (West/Zimmerman 1991).[7] Aus dieser Perspektive betrachtet wird das Geschlechterspiel zu einem Lehrstück, das bereits die wesentlichsten Elemente von Turings Argumentation enthält. Gewiß ging es Turing nicht primär um die Frage nach Natur und Ursache geschlechtsspezifischer Verhaltensunterschiede (und sein Geschlechterspiel ist natürlich auch kein empirischer Test für die konstruktivistische Geschlechterthese). Aber am Beispiel der alltäglichen Geschlechterdifferenz – und dem spielerischen Versuch, sie zum Verschwinden zu bringen – lassen sich wesentliche Elemente seiner theoretischen Argumentation veranschaulichen. Dies, und nicht irgendwelche Täuschungsmanöver, ist der Grund dafür, weshalb Turing seinen Test mit dem 'Geschlechterspiel' einleitet.

Was also heißt eigentlich 'Mann' bzw. 'Frau'? Was ist das Kriterium für Geschlechtszugehörigkeit? Und vor allem: Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit der männliche Spieler überhaupt eine Chance hat, das Geschlechterspiel zu gewinnen?

(1) Eine Chance, das Spiel zu gewinnen, hat er nur dann, wenn geschlechtsspezifisches Verhalten nicht biologisch determiniert ist. Diese Voraussetzung ist gewissermaßen die geschlechtertheoretische Variante der Grundannahme des Funktionalismus: Geschlechtsspezifisches Verhalten ist kein biologischer Zwang, sondern kann von physiologisch unterschiedlichen Körpern dargestellt werden. Andernfalls wüßte A vielleicht, wie B reagiert, wenn ihr dieses oder jenes geschieht, dieses Ver-

7 In der neueren Literatur zur Geschlechterdifferenz wird die konventionelle Trennung von 'gender' (kulturell erlerntes geschlechtsspezifisches Verhalten) und 'sex' (natürliche Geschlechtszugehörigkeit) infragegestellt (vgl. u.a. Butler 1991 und als immer noch aktuellen empirischen Überblick Kessler/McKenna 1978). Die sog. 'natürliche' Geschlechtszugehörigkeit, so wie sie sich unserer Wahrnehmung präsentiert, ist nicht einfach, wie es z.B. Andrew Hodges unterstellt, eine 'Naturtatsache', sondern ebenso kulturell konstruiert – und folglich im Prinzip auch erlernbar – wie das kulturelle Geschlecht. Daß der 'natürliche Unterschied' eine höchst voraussetzungsvolle kulturelle Leistung ist, illustrieren z.B. Studien zur Selbst- und Fremdwahrnehmung von Transsexuellen (u.a Hirschauer 1989). Gerade seine eigenen biographischen Erfahrungen haben es Turing vermutlich ermöglicht, sich des schillernden Charakters von Geschlechtszuschreibungen und geschlechtlicher Identität bewußt zu werden. Deshalb scheint es mir keinesfalls Zufall zu sein und erst recht keine 'Finte', daß Turing sein Experiment mit dem Geschlechterspiel einleitet.

halten aber nachzuahmen, wäre für ihn jedoch so unmöglich wie wegzufliegen, wenn es Herbst wird. Übertragen auf die differente 'Physis' von Computern und Menschen erweist sich diese Voraussetzung als außerordentlich relevant. Würde »Hirn« tatsächlich »Geist verursachen« (Searle 1986: 37) – oder Hormone Verhalten –, so hätte der Fragesteller das Spiel von vornherein für sich entschieden.

(2) Für eine erfolgreiche Imitation reicht diese Bedingung freilich nicht aus. Um weibliches Verhalten erfolgreich nachzuahmen, muß das kulturelle Wissen darüber, was Frausein und weibliches Verhalten in unserer Gesellschaft heißt, in irgendeiner Form vermittelbar sein. Solange Männer nicht dieselben Erfahrungen machen wie Frauen (und Maschinen nicht die gleichen wie Menschen), muß dem männlichen Spieler das entsprechende Wissen in irgendeiner Form beigebracht werden. Er hat sich einem Trainingsprogramm 'Frau' zu unterziehen – und dazu braucht er Frauen, die genau wissen, wie Frauen sich in welchen Situationen zu verhalten pflegen und dieses Wissen auch vermitteln können.[8] Das ist ein heikler Punkt, auch für das Projekt der Künstlichen Intelligenz. Kann eine Frau einem Mann tatsächlich alles Wissenswerte über die weibliche Erfahrungswelt vermitteln? Läßt sich wirklich alles kulturelle Wissen in explizite Regeln fassen?

Diese Anforderung ist auch ein Grund dafür, weshalb sich die Aussagekraft des Geschlechterspiels über die Zeit hinweg verändert. Im 19. Jahrhundert wäre es einem Mann ungleich schwerer gefallen, eine Frau zu imitieren, als es in einer sehr viel weniger geschlechterdifferenzierten Gesellschaft wie der unsrigen der Fall ist. Im Vergleich zur hochgradig geschlechtssegregierten (bürgerlichen) Gesellschaft des 19. Jahrhunderts – und auch zu jener, in der Turing lebte – haben sich die Erfahrungswelten von Männern und Frauen im Laufe der letzten Jahre beträchtlich angeglichen. Heute stellt das Geschlechterspiel vor allem den Fragesteller vor Probleme. Woran erkennt man typisch weibliches Verhalten? Und

8 Ähnlich übrigens wie ein Spion, der für eine Mission eine neue Identität anzunehmen hat (vgl. Collins 1990: 6ff.). Ist die neue Umgebung kulturell und geographisch weit genug von seinem fingierten Heimatort entfernt, wird niemand an seiner Identität zweifeln. Das ändert sich, sobald er – zufällig oder auch nicht – mit jemandem konfrontiert wird, der tatsächlich von dort stammt. Denn auch wenn man ihm alles Denkbare über diesen Ort beigebracht hat, wird es nie dem entsprechen, was jemand weiß, der tatsächlich dort aufgewachsen ist. Dieses Beispiel zeigt auch, daß das Geschlecht des Fragestellers für das Geschlechterspiel keineswegs so irrelevant ist, wie Turing meinte. A hat eine ungleich höhere Chance, das Spiel zu gewinnen, wenn der Fragesteller ein Mann ist.

gibt es das überhaupt noch? In ähnlicher Weise verändert sich auch die Aussagekraft des Turingtests über die Zeit hinweg. Ich komme am Schluß dieses Kapitels darauf zurück.

Das Geschlechterspiel hat, wie gesagt, die Funktion, den eigentlichen Turingtest einzuleiten. »What will happen«, so fragt Turing anschließend, »when a machine takes the part of A in this game? Will the interrogator decide wrongly as often when the game is played like this as he does when the game is played between a man and a woman? These questions replace our original, 'Can machines think?'« (Turing 1950: 5) In Turings Imitationsspiel nimmt also der Computer den Platz jenes Spielers ein, der in seinem Verhalten ganz bewußt expliziten Regeln folgt. Und ebenso wie A wird auch er versuchen, den Fragesteller zu täuschen. Bittet man ihn, 27 mit 7453 zu multiplizieren, so wird er nach einer längeren Pause '201191' zur Antwort geben, und beschimpft man ihn, so wird er nicht weniger beleidigt reagieren als sein menschlicher Gegenspieler B. Was für A im Geschlechterspiel galt, gilt auch für die Maschine. Eine Chance, den Turingtest zu gewinnen, hat sie, zusammenfassend formuliert, nur unter folgenden drei Voraussetzungen:

(1) Entscheidendste und trivialste Voraussetzung ist die *Gültigkeit der Turingthese*. Sie liegt – in ihrer erweiterten Fassung – als Prämisse der Künstlichen Intelligenz zugrunde (vgl. S. 94).[9]

(2) Eine weitere wesentliche Voraussetzung ist die *Gültigkeit der funktionalistischen These* (vgl. S. 257). »Intelligence«, so Lucy A. Suchmans Zusammenfassung der funktionalistischen Doktrin, »is only incidentally embodied in the neurophysiology of the human brain, and what is essential about intelligence can be abstracted from that particular, albeit highly successful, substrate and embodied in an unknown range of alternative forms.« (Suchman 1987: 8) Denken ist nicht an ein bestimmtes materielles Substrat gebunden, sondern kann in verschiedenen physikalischen Systemen realisiert sein – in Menschen oder in Maschinen. Mit ihrem Begriff des 'physical symbol system' haben Herbert A. Simon und Allen Newell dem Funktionalismus eine eingängige Formulierung gegeben. Ein 'physikalisches' Symbolsystem ist, so Newells und Simons bündige Definition, »a machine that produces through time an evolving collection of

---

9 Damit ist freilich nicht behauptet, daß menschliches Denken immer und ausschließlich Regeln folgt. Turings These, daß jedes regelgeleitete menschliche Verhalten im Prinzip mechanisierbar ist, impliziert noch lange nicht den Umkehrschluß, die Annahme nämlich, daß sich alles menschliches Denken als formale Operation beschreiben läßt.

symbol structures« (Newell/Simon 1976: 40). Physikalische Symbolsysteme sind 'Symbolmaschinen', deren Symbole und Symbolketten in irgendeiner Form physikalisch realisiert sind. Wie und in welchen Medien, ist aus der Sicht des Funktionalismus nicht von Belang. »Symbol systems are called 'physical'«, so Herbert Simon mit einiger Provokation, »to remind the reader that they exist as real world devices, fabricated of glass and metal (computers) or flesh and blood (brains).« (Simon 1988: 28)

'Physikalisches Symbolsystem' wird damit zum Oberbegriff für zwei Spezies, die man bis anhin streng geschieden hatte, für die Spezies 'Mensch' und für die Spezies 'Maschine': »The computer is a member of an important family of artifacts called symbol systems, or more explicitely, physical symbol systems. Another important member of the family (some of us think, anthropomorphically, it is the most important) is the human mind and brain.« (Simon 1988: 26f.) Mensch und Computer unterscheiden sich zwar, was den 'Stoff' betrifft, aus dem ihre Gedanken gemacht sind, für ihre Fähigkeit, Information zu verarbeiten, ist diese stoffliche Differenz aber nicht von Bedeutung. Als physikalische Symbolsysteme sind beide gleichermaßen zu intelligentem Verhalten in der Lage. Die funktionalistische Annahme, daß zwischen Gehirn und Geist keine notwendige Beziehung besteht, ist die zweite Voraussetzung, die erfüllt sein muß, damit die Maschine eine Chance hat, das Imitationsspiel zu gewinnen.[10]

(3) Das Wissen, auf dem menschliches Verhalten beruht, muß im Prinzip *diskursiv zugänglich* sein: »If one wants to make a machine mimic the behavior of the human computer in some complex operation one has to ask him how it is done, and then translate the answer into the form of an instruction table.« (Turing 1950: 9) Diese Voraussetzung impliziert, daß die Menschen, die simuliert werden – die Frauen im Falle des Geschlechterspiels, Schachspielerinnen, Psychotherapeuten, Mathematiker, Ärztinnen etc. im Falle der Künstlichen Intelligenz –, immer wissen, was sie tun und wie sie es tun. D.h. ihr Verhalten muß ihnen (i) *bewußt* sein; sie müssen es (ii) auch *beschreiben* können (und wollen); und schließlich (iii) muß der Wissensingenieur ihre Aussage auch so *verstehen*, wie sie es tatsächlich gemeint haben. Alle drei Annahmen sind aus der Sicht einer kommunikationstheoretisch fundierten Wissenssoziologie freilich außerordentlich problematisch.

---

10 Daß diese Formulierung zu differenzieren ist, wird später im Zusammenhang mit der Unterscheidung zwischen 'schwacher' und 'starker' Äquivalenz bzw. 'schwacher' und 'starker' KI deutlich werden.

Mißt man dem Geschlechterspiel mehr als bloß spielerische Bedeutung zu, so ist es kaum zufällig, daß die Maschine die Rolle von A übernimmt, also jener Person, die in ihrem Verhalten bewußt expliziten Regeln folgt. Was A tut, weshalb er so antwortet und nicht anders, kann er, das liegt im Wesen dieser Spielanordnung, sprachlich zum Ausdruck bringen und begründen. Demgegenüber verhält sich B so, wie wir es normalerweise zu tun pflegen, unreflektiert nämlich. Warum man etwas tut und weshalb auf diese Weise und nicht anders, läßt sich oft nur mit großen Schwierigkeiten verbalisieren und manchmal überhaupt nicht. Es sind Routinen, Selbstverständlichkeiten, 'know-how' (und nicht 'know-that'), die das Verhalten leiten: praktisches Wissen, nicht diskursives. Das praktische Bewußtsein, so Anthony Giddens, »umfaßt all das, was Handelnde stillschweigend darüber wissen, wie in den Kontexten des gesellschaftlichen Lebens zu verfahren ist, ohne daß sie in der Lage sein müßten, all dem einen direkten diskursiven Ausdruck zu verleihen« (Giddens 1988: 36). 'Praktisches Bewußtsein' meint jenes Wissen, das ich in Anlehnung an den Begriff von Michael Polanyi als 'implizites Wissen' bezeichnet habe. Es ist das Wissen, das wir verinnerlicht und teilweise buchstäblich 'verkörperlicht' haben, jenes Wissen, das uns in unserem alltäglichen Handeln unreflektiert zur Verfügung steht, ohne daß wir es – im Gegensatz zum diskursiven Wissen – auch verbalisieren könnten.[11]

Der Unterschied zwischen diskursivem und praktischem Wissen ist die Differenz zwischen dem Wissen darum, welche Zutaten man in welcher Menge und in welcher Reihenfolge für eine Bouillabaise braucht, und dem Wissen, wie man Fahrrad fährt. Es ist die Differenz zwischen dem Wissen, wie man ein Programm verwendet, und der Fähigkeit, ein bekanntes Gesicht in einer Menge zu entdecken. Was sind die Zeichen dafür? Ist es die Form der Nase, die Haarfarbe, der Blick – oder was ist es sonst, woran wir jemanden erkennen?[12] Wir wissen mehr, als wir zu sagen wissen – das ist die Grundannahme, die der Unterscheidung zwischen diskursivem und praktischem (oder implizitem) Wissen zugrunde liegt, und was wir wissen, ist nicht ein für allemal in einem 'mentalen Lexikon' fixiert, sondern verändert sich ständig im Zuge unseres

11 Ein sehr schönes Beispiel für die Bedeutung impliziten Wissens ist die bereits erwähnte Studie von H.M. Collins über den Nachbau eines Lasergerätes, vgl. S. 222.

12 Das ist eines der Beispiele, an dem Michael Polanyi sein Konzept des 'impliziten Wissens' illustriert (Polanyi 1985: u.a. 14f.). Es ist von da her gesehen nicht zufällig, daß sich gerade das Mustererkennen – und Sehen überhaupt – als so schwierig zu programmieren erwiesen hat.

(kommunikativen und instrumentellen) Umgangs mit der Welt (vgl. Suchman 1987: 49ff.).[13]

Turing selbst nahm offensichtlich an, daß alle drei Bedingungen erfüllt sind. Seine Prognose des Spielausgangs war jedenfalls ausgesprochen optimistisch: Im Jahr 2000 werden Computer imstande sein, das Imitationsspiel zu gewinnen. Die Aussagekraft seines Verhaltensexperiments ist jedoch nicht unbestritten geblieben. Heißt erfolgreiche Täuschung wirklich, daß man von 'denkenden' Maschinen sprechen kann? Und was heißt 'denken' in diesem Fall? Die Antwort auf diese Frage hängt davon ab, wie man den Turingtest interpretiert, und darüber herrscht keineswegs Einigkeit. Es gibt drei Möglichkeiten, ihn zu verstehen, und je nachdem, für welche man sich entscheidet, präsentiert sich die Aussagekraft des Testes anders.

(1) Der Turingtest als *behavioristisches Experiment*. Für John R. Searle ist der Turingtest »unashamedly behavioristic and operationalistic«, da er von einem overten Verhalten, dem Sprechen, auf einen internen Prozeß, nämlich auf Denken schließe (Searle 1981: 304). 'Behavioristisch' ist freilich ein Titel für zwei ganz verschiedene Programme: (i) zum einen für die Forderung, wie sie am prominentesten B.F. Skinner vertreten hat, daß psychologische Aussagen auf beobachtbare Größen ('stimuli' und 'responses') beschränkt sein müssen. Mentalen Phänome-

13 Gegen diese Diskursivitätsbedingung ließe sich allerdings einwenden, daß Mechanisierung nicht immer Verbalisierung voraussetzt. Gegenbeispiele sind etwa das bereits in den 40er Jahren entwickelte 'record-playback'-Verfahren (vgl. Noble 1978) und heute natürlich vor allem die Lernmodelle des Konnektionismus. Neuronale Netze werden nicht explizit programmiert, sondern lernen gewissermaßen induktiv. Dem ist jedoch entgegenzuhalten, daß neuronale Netze nicht wirklich selbsttätig lernen, sondern es immer noch jemanden braucht, der ihr Verhalten beurteilt und die 'richtige' Lösung als Vergleichsbasis bereitstellt (z.B. die richtige Aussprache von englischen Wörtern im Falle von NETalk). Ich kann hier auf den Konnektionismus und seine Differenz zur 'kognitivistischen' Position nicht näher eingehen. Vgl. als populäre Einführung Allman 1990; programmatisch wird die Position des Konnektionismus dargestellt in Smolensky 1988 sowie Rumelhart 1990; einen informativen Überblick über die verschiedenen Ansätze und Projekte gibt Kemke 1988; und die Kontroverse zwischen Kognitivisten und Konnektionisten ist gut dokumentiert in Graubard 1988. Auch Turing war sich offenbar bewußt, daß die Diskursivitätsbedingung für seine Argumentation ein heikler Punkt ist. Jedenfalls hat er am Ende seines Aufsatzes sein Instruktions-Modell durch eine Art 'Sozialisationsmodell' ersetzt. Anstatt der Maschine alles Wissenswerte explizit einzugeben, sei es vielleicht praktischer, eine »child-machine« mit eigenen Sensoren zu konstruieren, die man ähnlich wie Kinder erziehen und eigene Erfahrungen machen lassen kann: »Instead of trying to produce a program to simulate the adult mind, why not rather try to produce one which simulates the child's? If this were then subjected to an appropriate course of education one would obtain the adult brain.« (Turing 1950: 26)

nen wird für die Erklärung von Verhalten keine kausale Bedeutung attestiert (methodologischer Behaviorismus). Und (ii) für die These, daß sich mentalistische Begriffe durch behaviorale ersetzen lassen (logischer Behaviorismus). Mentale Phänomene werden dabei als Verhaltensdispositionen interpretiert bzw. mentalistische Aussagen als hypothetische Verhaltensaussagen. Der Satz: 'x möchte gern (wünscht) ins Kino gehen', läßt sich in dieser Sicht umformulieren in das behaviorale Konditional: 'wenn ein geeigneter Film laufen würde (die Kinos offen hätten, x Zeit hätte etc.), würde x ins Kino gehen'. Im Gegensatz zum empirischen Behaviorismus akzeptiert der logische Behaviorismus die kausale Rolle mentaler Phänomene, aber wie dieser fordert er die Beschränkung wissenschaftlicher Aussagen auf beobachtbare Größen, d.h. auf overtes Verhalten. Die Substituierbarkeitsthese ist dann der Trick, beides doch noch zu vereinbaren (Bieri 1981: 31ff.; Hastedt 1988: 82ff.).

Wenn John Searle Turings Spiel als 'behavioristisch' bezeichnet, so hat er kaum die Skinnersche Variante im Auge, sondern die Position des logischen Behaviorismus. Denn die Substitutierbarkeitsthese läßt sich auch in umgekehrter Richtung lesen: Aus behavioralen Aussagen läßt sich im Prinzip auf zugrundeliegende mentale Phänomene schließen. Verhalten wird zum operationalen Kriterium für mentale Prozesse. Aus der Beobachtung, daß sich ein Computer gleich verhält wie ein Mensch, wird der Schluß gezogen, er gleiche ihm auch, aber, so Searle, aus der Tatsache, daß meine Rechenmaschine rechnet so wie ich, schließe man schließlich auch nicht auf irgendwelche kognitiven Gemeinsamkeiten zwischen ihr und mir.

Was die Position des logischen Behaviorismus problematisch macht, nämlich die These einer Substituierbarkeit behavioraler und mentalistischer Begriffe, gilt gemäß dieser Sicht auch für den Turingtest, mit dem Ergebnis, daß Turings Hoffnung, eine falsch formulierte Frage in eine handliche und praktikable umzuformulieren, in nichts zerfällt. Aus der Tatsache einer input-output-Äquivalenz kann man nicht auf interne Ähnlichkeiten schließen, und um diese gehe es bei der Frage: Können Maschinen denken? 'Imitation' ist, um das Begriffspaar von Searle zu gebrauchen, nicht dasselbe wie 'Duplikation' (Searle 1986: 36). Wer eine Krankheit simuliert, ist nicht krank, und wer kognitives Verhalten simuliert, braucht noch lange nicht zu denken. Der Turingtest mißt bloß, ob eine Maschine fähig ist, intelligentes *Verhalten* zu imitieren. Ob das auch 'denken' bedeutet, ist damit keineswegs ausgemacht.[14]

(2) Wenn aber Verhalten kein operationales Kriterium ist für mentale Prozesse, wie läßt sich dann je entscheiden, ob eine Maschine denkt – oder auch ein Mensch? Turing hat diesen Einwand vorausgesehen und ihn als *Bewußtseinsargument* bezeichnet. Nach diesem Argument könne man erst dann mit Sicherheit entscheiden, ob eine Maschine denkt, wenn man selbst die Maschine ist – »the only way to be sure (...) is to *be* the machine and to feel oneself thinking. One could then describe these feelings to the world, but of course no one would be justified in taking any notice. Likewise according to this view the only way to know that a man thinks is to be that particular man.« (Turing 1950: 17) Eine offensichtlich unpraktikable Verifikationsmethode, und dennoch zweifeln wir nur selten am Menschsein unseres Gegenübers und an seiner Fähigkeit zu denken. Denn anstatt unaufhörlich an den anthropomorphen Qualitäten unserer Mitmenschen zu zweifeln, unterstellen wir gewöhnlich, daß jeder Mensch denkt – »it is usual to have the polite convention that everyone thinks.« (Turing 1950: 17)

Die Sicherheit unserer Einschätzung beruht auf induktivem Wissen, und Ähnliches läßt sich auch für den Turingtest geltend machen. So gesehen ist das Imitationsspiel nicht ein behavioristisches Experiment, sondern ein *induktiver Test*. Das overte Verhalten wird nicht als Indikator für ein inneres Geschehen interpretiert, sondern gibt die Datenbasis ab für den – freilich immer mit Unsicherheiten behafteten – induktiven Schluß, daß unser Gegenüber denkt, genauso wie wir: »Ordinary knowledge that other humans think and how they think is generated by inductive inferences based on their behavior. Somebody is judged to think deeply or not so deeply about chess on the basis of that person's chess playing. On a common sense level nobody confuses thinking about a chess move with an actual move. The latter is evidence for the former. In numerous kinds of of human activities human behavior is regarded as inductive evidence for inner mental activity. An inductive approach is a

14 Diese – übrigens verbreitete – Interpretation des Turingtests verkennt allerdings meiner Ansicht nach die Intentionen von Turing. Turing wollte mit seinem Experiment diese Art von Schlußfolgerung gerade vermeiden, vgl. (3).

natural way to investigate other human minds and seems like an equally appropriate way to investigate computer minds.« (Moor 1987: 1127)[15]

Wenn wir unserem körperlichen Ebenbild, nur aus äußerlichen Gründen, Denkfähigkeit unterstellen, der erfolgreichen Nachbarmaschine aber nicht, halten wir uns nicht an die Regeln induktiver Evidenz. So gesehen gibt uns der Turingtest nicht nur eine Methode an die Hand, die Leistungen eines Computers zu beurteilen, er wirft auch ein Licht auf die Mechanismen zwischenmenschlicher Attribution. Die gegenseitige Attestierung von 'Menschsein' ist eine Unterstellung, »a polite convention«, die niemals endgültig nachprüfbar ist. Was wir Menschen zubilligen, sollten wir gerechterweise auch der Maschine gegenüber tun. Gleichen sich die Indizien, so sind daraus dieselben Schlüsse zu ziehen, unbeschadet, ob unser Gegenüber nun wie ein Mensch aussieht oder wie eine Maschine. Oder wie Turing mit schöner Ironie schreibt: »We do not wish to penalize the machine for its inability to shine in beauty competitions, nor to penalize a man for losing in a race against an airplane.« (Turing 1950: 6)

(3) Gemäß einer dritten Interpretation, und sie kommt meiner Ansicht nach den Intentionen von Turing am nächsten, hat der Turingtest vor allem eine *sprachnormative* Bedeutung. Seine Funktion besteht nicht darin, Existenzaussagen aufzustellen, sondern lediglich darin, den Sprachgebrauch zu regeln. Turing interessierte sich nicht für die Frage, ob Maschinen tatsächlich intelligent *sind*, sondern unter welchen Bedingungen man sie gerechterweise als intelligent *bezeichnen* sollte: »I believe that at the end of the century the use of words and general educated opinion will have altered so much that one will be able to speak of machines thinking without expecting to be contradicted.« (Turing 1950: 14) Turing hat versucht, die Frage: 'Können Maschinen denken?' von ihren essentialistischen Konnotationen zu befreien. Das Ergebnis ist ein Verhaltensexperiment, mit dem Ziel, unseren Sprachgebrauch zu regeln. Anstatt über innere Wesensähnlichkeiten zu spekulieren, wird der Vergleich am Verhalten festgemacht – genau genommen am *Sprechen*.

Dies unterscheidet Turings Experiment auch von den Testsituationen, denen frühere Automaten ausgesetzt waren. Die klassischen Automaten haben nicht Denken simuliert (bzw. Sprechen), sondern Gesten und Bewegungen. Entsprechend wurden sie auch definiert: Ein Automat ist, so die *Allgemeine Enzyklopädie der Wissenschaften und Künste* von 1820,

15 Was J.H. Moor hier als 'induktiven approach' bezeichnet, ist genau jenes Verfahren, das auch bei der dokumentarischen Methode der Interpretation zum Zuge kommt. Ich komme darauf zurück.

»ein mechanisches Kunstwerk, welches gewöhnlich in der Figur eines Menschen oder Thieres (...) wie ein belebtes Wesen selbsthätig zu wirken scheint«. Es sei um so vollkommener, je täuschender es die »Bewegungen und Verrichtungen belebter Wesen« nachahme (zit. in Gendolla 1980: 15). Entsprechend hatte sich Menschlichkeit damals auch anders zu beweisen: Nachdem man entdeckt hatte, daß Olimpia nicht eine Frau war, sondern ein bloßes Automat, wurde aus Sicherheitsgründen von »mehrern Liebhabern verlangt, daß die Geliebte etwas taktlos singe und tanze, daß sie beim Vorlesen sticke, stricke, und mit dem Möpschen spiele« (Hoffmann 1816: 173). Was die damaligen Liebhaber vielleicht noch zu beruhigen vermochte, bietet den heutigen keine Garantie mehr. Die modernen Automaten imitieren, ohne zu gleichen. Die Maschine in Turings Test simuliert nicht Gesten oder Bewegungen, sondern Denken bzw. Sprechen. Mit Schritten, die aus dem Takt fallen, mit irregulären Bewegungen allein, läßt sich der Verdacht nicht mehr zerstreuen. 'Menschlichkeit' muß sich heute anders beweisen, über regelloses Denken, nicht über taktloses Tanzen. Über ein Denken mit anderen Worten, das nicht 'mechanisch' ist.[16]

Wie auch immer man die Aussagekraft von Turings Experiment interpretiert, der Test selbst macht keine direkten Aussagen über mentale Prozesse. Vergleichskriterium ist das overte Verhalten (und nicht die Vorgänge im Innern der Protagonisten – der 'through-put' gewissermaßen). Ob im Innern der Maschine dasselbe vorgeht wie im Kopf ihres menschlichen Gegenspielers, wenn man sie nach ihrem Lieblingsgedicht fragt oder nach ihrer Kindheit, ob sie, etwas technischer ausgedrückt, dem gleichen Algorithmus folgen, wenn sie auf dieselbe Frage (input) dieselbe Antwort geben (output), interessiert in diesem Zusammenhang nicht. Beurteilt wird ausschließlich das Verhalten – Testkriterium ist 'schwache Äquivalenz', Imitation, nicht Duplikation. Zenon W. Pylyshyn, einer der Hauptvertreter der (klassischen) Cognitive Science, hat dem Kriterium der schwachen Äquivalenz das sehr viel stärkere einer (formalen) Übereinstimmung auch der *inneren* Prozesse gegenübergestellt. Im Gegensatz zum Turingtest, der sich mit einer Vergleichbarkeit des overten Verhaltens begnügt, beruht die Cognitive Science auf der Annahme einer 'harten Äquivalenz'. Aus der Sicht von Zenon Pylyshyn ist das Diktum 'thinking is computing' wörtlich zu nehmen: Denken *ist*

16 Daß damit ein Schwierigkeit verbunden ist, hat u.a. auch Emil Post erkennen müssen, als er zu beweisen suchte, daß die Maschine dem Menschen immer unterlegen sein wird, vgl. S. 103.

Rechnen (verstanden als formale Symbolmanipulation), und es vollzieht sich beim Menschen auf genau dieselbe Weise wie bei einem Computer: »Computation is a *literal* model of mental activity, not a simulation of behavior, as was sometimes claimed in the early years of cognitive modeling. Unlike the case of simulating, say, a chemical process or a traffic flow, I do not claim merely that the model (der Computer, B.H.) generates a sequence of predictions of behavior, but rather that it does so in *essentially the same way* or by virtue of the same functional mechanisms (not, of course, the same biological mechanisms) and in virtue of having something that corresponds to the same thoughts or cognitive states as those which govern the behavior of the organism being modeled.« (Pylyshyn 1986: 43)[17]

Der Anspruch, den Turing mit seinem Experiment verband, war, wie gesagt, um einiges bescheidener. Wie der Computer dazu kommt, ein Gedicht aufzusagen, seinen Tagesablauf zu beschreiben oder eine Rechenaufgabe zu lösen, welche inneren Prozesse dabei ablaufen und ob sie den menschlichen gleichen, wird im Turingtest nicht geprüft. Nur das Verhalten muß sich gleichen, nicht das Innenleben. Das ist das Erfolgskriterium beim Turingtest. Turing selbst war der Ansicht, daß es im Jahr 2000 Programme geben werde, die seinen Test problemlos bestehen – »it will be possible to program computers with a storage capacity of about $10^9$, to make them play the imitation game so well that an average interrogator will not have more than 70 per cent chance of making the right

17 Das 'Computermodell des Denkens' beruht, grob gesagt, auf drei Annahmen: (1) Menschen handeln auf der Basis von internen Repräsentationen, die sich unabhängig von ihrem physischen Substrat beschreiben lassen. Mit dieser mentalistischen Position grenzt sich die 'computional theory of mind' auf der einen Seite gegen den Behaviorismus, auf der anderen Seite gegen reduktionistische Programme ab. (2) Die inhaltlichen Repräsentationen sind codiert im Medium einer formalen Sprache – einer 'language of thought' (Fodor), die neurophysiologisch 'implementiert' ist. D.h. die Symbole und Symbolketten haben gleichzeitig physikalische Eigenschaften, und dies erklärt in den Augen der Funktionalisten die 'Leib/Seele-Interaktion', die den Philosophen so zu schaffen macht, d.h. die Erfahrungstatsache, daß mentale Zustände auf den Körper offensichtlich kausale Wirkung haben können. (3) Denken vollzieht sich als formale Symboltransformation, d.h. als algorithmische Operation über den Symbolen der 'language of thought'. Das ist mit dem Diktum 'thinking is computing' gemeint; vgl. zum Maschinenmodell des Geistes ausführlicher Heintz 1990b. Programmatisch wird der Standpunkt der 'computational theory of mind' vor allem in den Arbeiten von Zenon W. Pylyshyn und Jerry Fodor formuliert (u.a. Pylyshyn 1986; Fodor/Pylyshyn 1989; Pylyshyn 1990). In den letzten Jahren hat die klassische Cognitive Science, so wie sie neben Pylyshyn u.a. Jerry Fodor, Herbert Simon und Allen Newell vertreten, allerdings durch den Konnektionismus beträchtliche Konkurrenz bekommen.

identification after five minutes of questioning.« (Turing 1950: 13) In gewisser Hinsicht hat sich Turings Prophezeiung schon heute erfüllt. Seine Prognose, die für die damaligen Verhältnisse ausgesprochen waghalsig war, erweist sich im nachhinein als eher zu vorsichtig. Es sind vor allem zwei Programme, die dafür berühmt geworden sind, den Turingtest bestanden zu haben. Das eine ist das oft zitierte ELIZA-Programm von Joseph Weizenbaum, das andere ist das PARRY-Programm von Kenneth M. Colby.

ELIZA ist ein Sprachanalyse-Programm, mit dem man eine Art 'Unterhaltung' führen kann. Joseph Weizenbaum hat es in den frühen 60er Jahren am MIT entwickelt (Weizenbaum 1966). Das Programm besteht, vereinfacht formuliert, aus einem Sprachanalysator, der die Sätze analysiert, die man ihm eingibt, und einem (variierbaren) 'Skript', das (situationsspezifische) Regeln enthält zur Generierung von Antworten. Je nach Gesprächssituation, die man simulieren möchte, wird das Skript entsprechend verändert. Eine Auskunft bei der Bahn läuft nach anderen Regeln ab als eine Unterhaltung über Programmfehler oder, und das ist die Situation, die Weizenbaum wählte, als ein psychotherapeutisches Gespräch. Trotz ihrer Unterschiede haben alle drei Gesprächssituationen jedoch ein Merkmal gemeinsam: Es sind Kommunikationssituationen, die einen hohen Grad an Strukturiertheit aufweisen, Situationen mit anderen Worten, von denen man gewöhnlich akzeptiert, daß sie klaren Regeln folgen, wenig assoziativ sind und nur einen geringen Verhaltensspielraum zulassen. Dies, und nicht eine inhaltliche Überlegung, war der Grund dafür, daß Weizenbaum ELIZA einen Psychotherapeuten simulieren ließ, genauer: einen Rogertherapeuten. In der Rogertherapie hält sich die Therapeutin mit eigenen Deutungen weitgehend zurück. Sie beschränkt sich darauf, Bemerkungen aufzunehmen und sie dem Klienten als Fragen wieder zurückzugeben. Wer eine Rogertherapie wählt, kennt und akzeptiert diese Spielregeln (und für die Programmiererinnen und Programmierer haben sie den Vorteil, daß sie in jedem Lehrbuch nachzulesen sind). Wenn der Patient z.B. klagt: 'I need some help, that much seems certain', dann antwortet die Therapeutin (oder ELIZA): 'What would it mean to you if you got some help?' Und wenn der Patient dann sagt: 'Perhaps I could learn to get along with my mother', dann gibt ELIZA (oder die Therapeutin) zur Antwort: 'Tell me more about your family' (Weizenbaum 1966: 24). Weder die Therapeutin noch ELIZA brauchen dazu zu wissen, was eine 'Mutter' oder was eine 'Familie' ist.

Es genügt die Kenntnis, daß 'Familie' sich aus 'Eltern' und 'Kindern' zusammensetzt.

Mit ELIZA konnte man also eine Art 'psychotherapeutisches' Gespräch führen, und die meisten, die das taten, waren fasziniert. Wie Weizenbaum in seinem Buch *Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft* beschreibt, entwickelten viele Menschen, die sich auf diese Weise mit ELIZA 'unterhielten', eine enge Beziehung zum Programm. Sie fühlten sich verstanden, wie wenn sie mit einer wirklichen Therapeutin gesprochen hätten. Einige Psychiater kamen sogar auf die Idee, ELIZA in der Psychotherapie einzusetzen. Man könnte damit, wie Kenneth M. Colby zuversichtlich verkündete (er entwickelte einige Jahre später das PARRY-Programm), in einer Stunde mehrere hundert Patienten therapieren (Weizenbaum 1978: 17). Obschon ELIZA, wie John Searle es ausdrücken würde, nur eine Syntax hat und keine Semantik, d.h. weder begreift, was man ihr sagt, noch versteht, was sie zur Antwort gibt, hatten viele, die das Programm benützten, das Gefühl, mit einer leibhaftigen Therapeutin zu sprechen.

Das zweite Programm, PARRY, wurde ganz gezielt dem Turingtest unterzogen (Colby u.a. 1972; Colby 1981). Bei PARRY handelt es sich um ein Programm, das paranoides Verhalten simuliert. Die Versuchsanordnung besteht, vereinfacht ausgedrückt, darin, daß Experten und Expertinnen über einen Monitor wahlweise mit PARRY bzw. einem Menschen verbunden sind, der als paranoid diagnostiziert wurde – genauso wie es Turing in seinem Versuchsdesign beschrieben hatte. Die Aufgabe der Expertengruppe bestand nun darin, mit beiden ein klinisches Gespräch zu führen, ohne daß sie wußten, daß es sich im einen Fall um einen Menschen, im anderen Fall aber um ein Programm handelte. Die Interviewprotokolle wurden anschließend einem größeren Kreis von Experten unterbreitet, die ebenso wie die erste Gruppe eine Diagnose zu erstellen und zu beurteilen hatten, ob der Patient ein Mensch oder ein Programm war. Das Resultat fiel – wenn auch aus ganz anderen Gründen – für die psychiatrische Zunft ähnlich ernüchternd aus wie die Reaktion auf ELIZA: Die Psychiater haben Programm und Patienten mit gleicher Häufigkeit als paranoid eingestuft, und sie waren außerstande, die realen Patientinnen und Patienten von ihrer Simulation zu unterscheiden: »100 randomly selected psychiatrists were sent protocols of two interviews, one with a patient and one with a program, and were asked to judge which is which. Out of 40 responses 21 (52%) were right and 19 were wrong. Since this again approaches a chance level, we can conclude that psychiatrists using teletyped data do not distinghuish real patients from our simulation of a paranoid patient.« (Colby u.a. 1972: 220)[18]

PARRY hat damit das Imitationsspiel eindeutig gewonnen, ganz ähnlich wie auch ELIZA – folglich, und das ist die Konsequenz, die man an sich zu ziehen hätte, müßte die Frage 'Können Maschinen denken?' zumindest für diese beiden Programme positiv beantwortet werden.[19]

## 2. Die sozialen Voraussetzungen künstlicher Intelligenz

Deciding whether machines think is like deciding whether slaves think.
*Amelie O. Rorty*[20]

Alan Turing hat mit seinem Test eine 'schwache' Variante der Künstlichen Intelligenz vertreten: Computer sind zu einem *Verhalten* fähig, das bei einem Menschen als intelligent gelten würde. Der Streit um die Künstliche Intelligenz dreht sich aber in der Regel um eine sehr viel stärkere Variante: Ist es denkbar, daß Programme irgendwann einmal nicht mehr nur bloß so tun, als ob sie intelligent wären, sondern es tatsächlich auch sind (Searle 1981: 282f.)? Für die Kritiker und Kritikerinnen der Künstlichen Intelligenz ist die Antwort auf diese Frage ein klares 'nein'. Es sind vor allem zwei Argumentationsstrategien, mit denen sie ihre Skepsis zu begründen suchen. Im einen Fall wird zwar konzediert, daß Computer menschliches Verhalten imitieren können, in Zukunft vielleicht sogar perfekt, aber um wirklich intelligent zu sein, fehle ihnen ein entscheidendes Merkmal. Je nach theoretischer Orientierung wird für dieses

18 In einer frühen Entwicklungsphase des Programms haben sich einige Experten auf bezeichnende Weise geirrt: Anstatt ihren Gesprächspartner als paranoid zu diagnostizieren, waren sie der Ansicht, es mit einem Hirngeschädigten zu tun zu haben (Colby 1972: 207). Das mag Weizenbaum erst recht dazu inspiriert haben, Colbys Experiment zu replizieren, diesmal allerdings mit einem 'autistischen' Programm. Sein Experiment sei ähnlich erfolgreich verlaufen wie jenes von Colby, teilt Weizenbaum 1974 den Lesern und Leserinnen des *ACM Forum* in größter Ernsthaftigkeit mit. M (von N) Psychiatern hätten sein Programm, das genauso antworte wie ein Autist, nämlich gar nicht, für einen menschlichen Autisten gehalten (Weizenbaum 1974).

19 Die beiden Programme haben es allerdings vergleichsweise einfach gehabt, das Imitationsspiel zu gewinnen. Sie mußten ihre Simulationskompetenz nur auf einer einzigen Verhaltensdimension beweisen – und nicht noch zusätzlich, wie es Turing ursprünglich gefordert hatte, Gedichte schreiben, mathematische Aufgaben lösen oder von ihrem letzten Urlaub berichten. Vor kurzem war zu lesen, daß acht Programme einem (in diesem Sinne eingeschränkten) Turingtest unterzogen worden sind (vgl. *Spiegel* 1991, 47). Gewinner war, wieder einmal, ein Psychotherapie-Programm.

20 Rorty 1962: 118.

Merkmal z.B. 'Bewußtsein' eingesetzt, 'Subjektivität' oder 'Intentionalität'. John Haugeland bezeichnet diese Argumentationsstrategie als 'hollow shell'-Strategie (Haugeland 1981: 32). Ein typischer Vertreter ist John R. Searle. Die zweite Argumentationsstrategie ist, was die Einschätzung der Leistungen der Künstlichen Intelligenz anbelangt, noch um einiges rigoroser. Weil menschliches (Alltags-)Handeln eine Kompetenz erfordert, zu der Maschinen aus prinzipiellen Gründen nie in der Lage sein werden, stößt bereits die bloße Verhaltensimitation auf eine deutliche Grenze. Haugeland bezeichnet diese Argumentationsstrategie als 'poor substitute'-Strategie (Haugeland 1981: 33f.). An dieser Argumentationslogik orientiert sich die KI-Kritik von Hubert L. Dreyfus, aber auch das sogenannte 'Gödelargument', das Turing schon 1950 bedenkenswert erschien und von John Lucas in den frühen 60er Jahren weiter ausgearbeitet wurde.

Worin die Differenz zwischen den beiden Argumentationsstrategien genau besteht, läßt sich auch am Beispiel des Geschlechterspiels verdeutlichen: Ein Mann, der weibliches Verhalten perfekt imitiert, wird dadurch – das wäre die Argumentation der 'hollow shell'-Strategie – noch lange nicht zu einer Frau. Die 'poor substitute'-Strategie setzt die Akzente etwas anders: Weil zwischen den beiden Geschlechtern eine unüberwindbare Differenz besteht, wird es einem Mann nie perfekt gelingen, weibliches Verhalten zu imitieren. Die Kritik an der Künstlichen Intelligenz, wie sie vor allem auch von philosophischer Seite vorgebracht wird, erschöpft sich selbstverständlich nicht in diesen beiden Positionen. Aber die meisten Argumente, die vorgebracht werden, um zu begründen, daß zwischen Mensch und Maschine eine grundlegende Differenz besteht, schwenken früher oder später in eine der beiden Argumentationslinien ein, für die ich im folgenden stellvertretend die Argumentation von John Searle, John Lucas und Hubert Dreyfus bzw. Lucy A. Suchman darstellen werde.

(1) In den Augen von John R. Searle läßt sich menschliches Verhalten zwar imitieren – Computer können so tun, als ob –, nur sagt eine solche Imitation nichts über die wirklichen Fähigkeiten des Computers aus. Auch wenn das Verhalten einer Maschine kaum mehr von jenem eines Menschen zu unterscheiden ist, so sind sich die beiden doch in keiner Weise ähnlicher geworden: »Kein Computerprogramm kann jemals ein Geist sein, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil ein Computerprogramm bloß syntaktisch und der Geist mehr als bloß syntaktisch ist. Der Geist ist semantisch – semantisch in dem Sinne, daß er mehr hat als eine

formale Struktur: er hat einen Gehalt.« (Searle 1986: 30) Was damit genau gemeint ist, hat Searle 1981 an einem vieldiskutierten und oft nacherzählten Gedankenexperiment zu veranschaulichen versucht.

Versteht ein Computer, der ein Gespräch auf chinesisch führen kann, tatsächlich chinesisch? Das ist die Ausgangsfrage von Searle, und wie die Antwort aussehen müßte, illustriert er an einem hübschen Gedankenexperiment (Searle 1981). Man stelle sich vor, in einem Zimmer eingesperrt zu sein. In diesem Zimmer befindet sich nichts außer einigen Körben mit chinesischen Zeichen und einem Handbuch, in dem genau (und auf deutsch) aufgeschrieben ist, was wann mit den verschiedenen Zeichen zu geschehen hat. Die Regeln des Handbuchs nehmen keinen Bezug auf den Inhalt der Zeichen, sondern beziehen sich ausschließlich auf deren äußere Form. In gewissen zeitlichen Abständen werden mir von den Leuten draußen Zeichen in das Zimmer gereicht, und meine Aufgabe besteht darin, gemäß der Regeln des Handbuchs entsprechende Zeichen herauszugeben. Wenn mir z.B. ein Zeichen der Form ♋ in das Zimmer gereicht wird, habe ich, wie ich im Handbuch nachlesen kann, das Zeichen ♑ aus dem Korb zu holen. Dasselbe gilt natürlich auch für Folgen von Zeichen. Von mir aus gesehen beschränkt sich meine Aktivität darauf, Zeichen gemäß der Regeln in meinem Buch zusammenzustellen und sie anschließend herauszureichen. Von außen betrachtet sieht derselbe Vorgang jedoch ganz anders aus. Die Zeichen, die man mir in das Zimmer reicht, sind für die Außenstehenden Fragen, und die Symbole, die ich herausgebe, werden von ihnen als Antworten interpretiert. Was in ihren Augen so aussieht, als ob ich chinesisch verstünde, hat von mir aus gesehen mit 'chinesisch' und 'verstehen' freilich überhaupt nichts zu tun. Ich führe bloß einen Algorithmus aus – »I simply behave like a computer; I perform computational operations on formally specified elements (...) I am simply an instantiation of the computer program.« (Searle 1981: 285)[21]

Mit diesem Beispiel versucht Searle etwas zu verdeutlichen, was auch die Gegner der formalistischen Mathematik immer wieder vorgebracht haben: Verstehen umfaßt sehr viel mehr als formales Operieren mit bedeutungsfreien Symbolen. Computer mögen menschliches Verhalten zwar vielleicht perfekt imitieren, um aber wirklich intelligent zu sein, fehlt ihnen ein ganz entscheidendes Merkmal. In den Augen von Searle ist es die

21 Searles Gedankenexperiment macht noch einmal deutlich, wofür bereits der Umgang mit ELIZA ein instruktives Beispiel war: Es sind die Benutzer, die die Leistungen des Computers mit Sinn und Bedeutung versehen – und ihm dadurch im Endeffekt Handlungsfähigkeit unterstellen. Ich komme darauf zurück.

menschliche *Intentionalität*, die die unaufhebbare Grunddifferenz zwischen Mensch und Maschine ausmacht, d.h. die Tatsache, daß sich das Denken der Menschen gewöhnlich[22] auf etwas bezieht, von etwas handelt. Intentionalität ist, so Searle, »das, womit unsere Geisteszustände auf andere Gegenstände oder Sachverhalte gerichtet sind, von ihnen handeln, sich auf sie beziehen, über sie gehen. 'Intentionalität' bezieht sich nicht bloß auf Intentionen, sondern auch auf Überzeugungen, Wünsche, Hoffnungen, Befürchtungen, Liebe, Haß, Begierde, Ekel, Scham, Stolz, Irritation, Amüsiertheit und alle andern Geisteszustände (ob bewußt oder unbewußt), die sich auf die außergeistige Welt beziehen oder von ihr handeln.« (Searle 1986: 15)[23] Durch intentionale Zustände wird die Welt repräsentiert, je nach psychischem Modus in einer etwas anderen Färbung. Intentionalität, d.h. die Fähigkeit der Menschen, sich Dinge vorzustellen und mit Bedeutung zu versehen, ist nicht nur das wesentlichste Unterscheidungsmerkmal zwischen Mensch und Maschine, es ist auch eine Differenz, die niemals aufhebbar ist. Denn die menschliche Intentionalität ist in den Augen von Searle biologisch fundiert. Es ist die spezifische Beschaffenheit des menschlichen Gehirns, das Menschen in die Lage versetzt, die Welt mit Bedeutung zu versehen. »Gemäß dem von mir vorgeschlagenen Bild (...) werden geistige Zustände sowohl von den Aktivitäten des Gehirns verursacht, als auch in der Struktur des Hirns (und des restlichen Zentralnervensystems) realisiert.« (Searle 1987: 328)

Für Searle sind mentale Phänomene durch das Gehirn verursacht und gleichzeitig sind sie Eigenschaften des Gehirns. Beide Behauptungen werden zusammengehalten durch eine Art 'Emergenztheorie' des Geistigen, die der statistischen Mechanik nachgebildet ist. Ähnlich wie z.B. der Aggregatzustand einer Substanz eine emergente Eigenschaft des Verhaltens der Elemente auf der Mikroebene ist, sind, so Searle, »geistige Phänomene von Hirnvorgängen auf der Ebene der Nervenzellen oder neuronalen Moduln verursacht, und zugleich in diesem aus Nervenzellen

---

22 Diese Einschränkung ist deswegen notwendig, weil nicht alle geistigen Zustände intentionalen Charakter haben. Nervosität, Hochstimmung oder Schmerz z.B. haben kein intentionales Objekt, d.h. sie sind nicht auf etwas bezogen (Bieri 1981: 139; Searle 1987: 15f.).

23 Im einzelnen spricht Searle nicht von Intentionalität, sondern von intentionalen Zuständen und unterscheidet dabei zwischen dem psychischen Modus ('ich hoffe, befürchte, glaube, vermute' etc.) eines intentionalen Zustandes und seinem Repräsentationsgehalt ('daß Computer denken können', 'daß Turing in einen vergifteten Apfel gebissen hat' etc.). Die Unterscheidung selbst ist der sprechakttheoretischen Unterscheidung zwischen dem propositionalen und illokutionären Bestandteil eines Sprechaktes nachgebildet (vgl. ausführlicher Searle 1987).

bestehenden System realisiert« (Searle 1986: 21).[24] Damit bezieht Searle eine klare – von ihm als 'biologischer Naturalismus' bezeichnete – Gegenposition zur funktionalistischen These, daß der 'Stoff', aus dem die Gedanken gemacht sind, für das Denken keine Rolle spielt. »Menschen denken wirklich, und das Denken geschieht in ihrem Gehirn« (Searle 1986: 49), das ist auf eine knappe Formel gebracht das Hauptargument, mit dem Searle gegen das Projekt der Künstlichen Intelligenz zu Felde zieht und das er in seinen Arbeiten auf mehr (Searle 1987) oder minder (Searle 1986) akademische Weise zu begründen sucht.

(2) Während John Searle nicht in Abrede stellt, daß Maschinen menschliches Verhalten imitieren können, vielleicht sogar perfekt, melden die Verfechter der 'poor substitute'-Strategie bereits hier ihre Zweifel an. Ein Argument, das schon sehr früh gegen das Projekt der Künstlichen Intelligenz vorgebracht wurde, stützt sich auf die verschiedenen limitativen Beweise, die Anfang der 30er Jahre die Grenzen des Hilbertschen Formalisierungsprogramms – und damit auch die Grenzen von Turingmaschinen (bzw. Computern) – aufgezeigt haben (Lucas 1961; Nagel/Newman 1958). Es wird niemals, das ist das Fazit der grundlagentheoretischen Arbeiten der 30er Jahre, eine Maschine geben, die imstande ist, alle wahren Sätze der Mathematik zu erzeugen und für jede beliebige Formel zu entscheiden, ob sie gültig ist oder nicht (vgl. Kap. 2). Aus diesen Resultaten zieht das sog. Gödelargument den Schluß, daß es Probleme gibt, die zu lösen eine Maschine niemals imstande sein wird. »Das Theorem zeigt uns«, so Nagel und Newman stellvertretend für viele, »daß Struktur und Leistungsfähigkeit des menschlichen Verstandes weit komplexer und differenzierter sind als die jeder bisher konzipierten leblosen Maschine.« (Nagel/Newman 1958: 99)

Was auf den ersten Blick einleuchtend erscheinen mag, entpuppt sich bei näherem Hinsehen als gar nicht so unproblematisch. Es ist zwar rich-

---

24 Auf den ersten Blick mag diese Analogie – Geist als Makroeigenschaft (=Aggregatzustand) von neurophysiologischen Prozessen auf der Mikroebene (= Bewegungen der Moleküle) – vielleicht noch einleuchten, genauer besehen hat sie aber vorwiegend metaphorischen Charakter. Denn im Unterschied zur Searleschen Antwort auf das mind/body-Problem ist die Emergenzkonzeption der statistischen Mechanik nicht eine bloße Heuristik, sondern eine ausformulierte Theorie. Eine echte Analogie wäre erst dann gegeben, wenn klare theoretische Vorstellungen darüber bestünden, wie sich die Beziehung zwischen der Mikro- und Makroebene im Einzelnen genau gestaltet. Davon aber ist Searle (und nicht nur er) weit entfernt. Das ist freilich nicht die einzige Kritik, die gegen Searles Argumentation vorgebracht werden kann. Bereits sein Gedankenexperiment (Searle 1981) hat eine breite und auch sehr kontroverse Diskussion nach sich gezogen.

tig, daß ein Computer nicht für jede gegebene Formel entscheiden kann, ob sie gültig ist oder nicht, nur ist auch ein Mensch dazu nicht imstande. Und was sich für Turings Halteproblem sagen läßt, trifft gleichermaßen auch auf Gödels Unvollständigkeitssatz zu. Es ist zwar richtig, daß der Gödelsatz G, der, salopp formuliert, von sich selbst behauptet, nicht beweisbar zu sein, nicht von einer Maschine bewiesen werden kann – aber auch ein Mensch kann ihn nicht beweisen. Denn ließe er sich beweisen, dann wäre er falsch, und wäre er falsch, dann stünde er im Widerspruch zum formalen System T, innerhalb dessen er formuliert worden ist. Und umgekehrt: Da Gödels Beweis ein *formaler* Beweis ist, kann der Gödelsche Unvollständigkeitssatz UV im Prinzip auch von einer Maschine bewiesen werden.[25]

(3) Was die Verfechter des Gödelarguments unter Berufung auf die Mathematik zu zeigen versuchen, daß es nämlich menschliche Fähigkeiten gibt, die niemals mechanisierbar sind, versucht Hubert L. Dreyfus von einer ganz anderen theoretischen Warte aus zu begründen. In den Augen von Dreyfus, einem KI-Kritiker der ersten Stunde, zeichnet sich menschliches Handeln über weite Strecken durch Eigenschaften aus, die nicht programmierbar sind (Dreyfus 1985; Dreyfus/Dreyfus 1987; 1989). Nur in Ausnahmefällen folgt das Handeln klaren Regeln; wenn wir handeln, handeln wir aus der Sicht der Phänomenologie, auf die sich Dreyfus bezieht, auf dem Boden und im Horizont unserer 'Lebenswelt'. Diese kann aber weder als Ganze vorstellig gemacht werden, noch läßt sie sich in atomare und kontextfreie Bestandteile zerlegen. Zudem ist die menschliche Wahrnehmung der Welt selektiv und geleitet von Interessen und Bedürfnissen, d.h. Menschen sind in der Lage, (subjektiv) Wichtiges von Unwichtigem zu unterscheiden. Menschen folgen, so faßt Dreyfus seine Argumentation zusammen, »offenbar weder für sich noch für Beobachter strengen Regeln. Hingegen scheinen sie sich einer ganzheitlichen Organisation ihrer Wahrnehmung zu bedienen, pragmatische Unterscheidungen zwischen wichtigen und unwichtigen Operationen zu treffen, sich an Paradigmata zu orientieren und ein gemeinsames Situationsverständnis zu benutzen, um sich verständlich zu machen.« (Dreyfus 1985: 240)

In eine ähnliche Richtung zielt ein anderes kritisches Argument (vgl. u.a. Dreyfus 1985: 323; Collins 1987: 264ff.). Um eine Regel R zu be-

---

25 Putnam 1975b zeigt meiner Ansicht nach überzeugend, daß das Gödelargument auf einer Verwechslung des Gödelsatzes G mit dem von Gödel bewiesenen Unvollständigkeitssatz UV beruht, der besagt, daß G in jedem widerspruchsfreien formalen System wahr ist; vgl. dazu auch ausführlich Webb 1980.

folgen, muß sie zuerst verstanden werden. Dies setzt ein Wissen W' voraus, das für die Programmierung explizit gemacht und in die Form einer Regel R' gebracht werden muß. Das Verstehen von R' erfordert aber seinerseits ein Wissen W'', das wiederum in eine Regel'' überführt werden muß etc. ad infinitum.[26] Dieses (von Wittgenstein entliehene) Argument behauptet einen grundlegenden Unterschied zwischen dem (intentionalen) Befolgen einer Regel und dem (mechanischen) Ausführen einer Instruktion (vgl. u.a. Searle 1986: 45ff.; Shanker 1987: 88ff.). Im einen Fall hängt mein Handeln davon ab, wie ich die Regel *interpretiere*, im anderen Fall führe ich (oder eine Maschine) unreflektiert einen Algorithmus aus. S.G. Shanker spricht in diesem Zusammenhang von 'normativer Aktion' versus 'mechanischer Operation' (Shanker 1987: 89). Diese konzeptuelle Unterscheidung zwischen dem Befolgen einer Regel und dem Ausführen eines Algorithmus ist insbesondere auch gegen Turings psychologisches Modell gerichtet, mit dem er zu zeigen versuchte, daß sich 'Regeln' in 'Algorithmen' transformieren lassen: Jedes regelgeleitete Handeln läßt sich, das ist das Fazit seiner Argumentation, in Elementaroperationen zerlegen, zu deren Ausführung keinerlei interpretative Vorleistung erforderlich ist (vgl. S. 95).

Um die Grenzen maschineller Intelligenz abzustecken, hat Dreyfus eine Wissenstypologie entwickelt, die zwischen vier Bereichen intelligenten Handelns unterscheidet, wobei der vierte Wissensbereich von grundlegend anderer Beschaffenheit ist als die übrigen drei. Die eine Seite wird durch Wissensbereiche repräsentiert (Bereich I, II und III), die sich im Prinzip vollständig in Termini von Regeln und isolierbaren Fakten beschreiben lassen. Zu Bereich I gehören alle Formen reaktiven Verhaltens, bei denen Kontext und Bedeutung irrelevant sind. Gedächtnisspiele, Wort-für-Wort-Übersetzungen, das mechanische Auswendiglernen von Silben etc. sind Beispiele dafür. Der angrenzende Wissensbereich (II) ist der Bereich der einfachen formalen Systeme. Beispiele dafür sind etwa

26 Dieser unendliche Regreß, in der eine Explizierung von Wissen notwendigerweise gerät, läßt sich sehr schön an einem Experiment veranschaulichen, das Harold Garfinkel mit seinen Studentinnen und Studenten durchgeführt hat. Den Studierenden wurde die Aufgabe gestellt, sich ein kurzes Alltagsgespräch auszudenken und anschließend zu beschreiben, worüber gesprochen wurde. Früher oder später gaben alle auf. Was im praktischen Handeln offensichtlich kein Problem ist, nämlich zu verstehen, was meine Arbeitskollegin mit dem Satz 'Ich bin zu spät aufgewacht. Deshalb habe ich den Zug verpaßt' sagen will, wird zu einem unüberwindbaren Hindernis, wenn die Bedeutung explizit gemacht werden soll, ohne daß ein gemeinsamer Erfahrungshintergrund vorausgesetzt werden kann; vgl. auch Suchman 1987: 46ff.

Spiele wie Dame oder Tic-Tac-Toe oder (einfache) mathematische Kalküle. In jedem Fall läßt sich das notwendige Wissen erschöpfend beschreiben und in explizite Regeln überführen. Der dritte Wissensbereich unterscheidet sich vom zweiten vor allem in quantitativer Hinsicht. Auch hier ist es im Prinzip möglich, das notwendige Wissen erschöpfend zu beschreiben, doch dessen Umfang und Komplexität machen eine Formalisierung aus rein praktischen Gründen außerordentlich aufwendig. Während in diesem dritten Wissensbereich die Mechanisierungsgrenzen primär technisch begründet werden – und sie folglich, z.B. im Zuge leistungsfähigerer Hardware, auch verschiebbar sind –, haben sie beim letzten Wissenstypus prinzipiellen Charakter und sind entsprechend auch nicht überwindbar. Zu Bereich IV zählt Dreyfus alle jene alltäglichen Handlungen, die »zwar regel*mäßig*, aber nicht regel*geleitet* sind« und die auf einem Wissen gründen, das sich nicht in Termini von Regeln und Fakten beschreiben läßt (Dreyfus 1985: 248).

Wesentlicher als die Wissenstypologie selbst ist die Überlegung, die ihr zugrunde liegt – die Annahme nämlich, daß, wie es H.M. Collins formuliert, die Welt des Wissens aus zwei Arten von »cognitive stuff« besteht, die eine davon ist programmierbar, die andere nicht. Simulierbar ist nur jener letztlich kleine Wissensbereich, der vollständig in Termini von Regeln und Fakten beschrieben werden kann. Alles andere 'Wissen', und dazu gehören vor allem jene lebensweltlichen Fertigkeiten, die in unserem praktischen Handeln immer vorausgesetzt sind, läßt sich niemals erschöpfend beschreiben. »Commonsense understanding isn't a kind of knowledge at all«, so Dreyfus' knappe Zusammenfassung seiner Argumentation anläßlich eines Podiumsgesprächs. »People don't have a lot of facts and rules in their minds for understanding the everyday world (...) We don't need commonsense knowledge to be intelligent and to know what matters to our kind of being because we *are* it. We don't need to *know* about bodies because we *are* bodies, and the same for emotions and situations. That is, we *are* bodies, we *have* emotions, and we're in situations whereas computers are outside and have to be given knowledge of all that.« (Dreyfus u.a. 1984: 145)

Dreyfus argumentiert aus einer (erweiterten) phänomenologischen Perspektive. Doch gerade in dieser Tradition müßte an sich die Kritik am Anspruch der Künstlichen Intelligenz sehr viel radikaler ausfallen. Aus der Sicht der Phänomenologie macht es keinen Sinn, die Welt des Wissens in zwei Domänen aufzuteilen. Ganz im Gegenteil. Alles Wissen, auch das noch so abstrakte, ist letztlich im lebensweltlichen Erfahrungswissen verankert und bezieht von ihm her seinen Sinn. Es gibt, anders formuliert, kein formales Wissen ohne das informelle, aus dem es hervorgewachsen ist und auf das es immer bezogen bleibt. Entsprechend fällt es im Rahmen dieser Tradition nicht weiter schwer zu begründen, weshalb maschinelle Intelligenz *nicht* realisierbar ist, wohl aber zu erklären, weshalb – aller argumentativen Evidenz zu Trotz – Computer eben doch zu mancherlei imstande sind.

Dieser Erklärungsschwierigkeit, in die eine konsequent phänomenologische Sichtweise notwendig gerät, versucht Dreyfus mit seiner Zweiteilung des Wissens zu entgehen. Simulierbar ist nur jener Wissensbereich, wo wir uns an klare Regeln halten – jener Bereich, wo auch wir im Prinzip in einem Buch nachschlagen müssen, um zu wissen, was als nächstes zu tun ist. Wo immer aber Erfahrungswissen eine Rolle spielt – 'commonsense knowledge' in Dreyfus' Terminologie -, sind wir nicht durch Computer ersetzbar, und wo immer ein solches vorausgesetzt ist, sollte man Computer auch nicht einsetzen.[27] Mit dieser Aufteilung der Welt des Wissens in zwei klar separierbare Gebiete, gelingt es Dreyfus zwar, dem empirischen Phänomen 'intelligenter' Programme Rechnung zu tragen, aber nur unter Abschwächung seiner ursprünglichen theoretischen Orientierung.

Konsequenter (und konsistenter) scheint mir die Position von Lucy A. Suchman zu sein, die die Künstliche Intelligenz aus der Perspektive der Interpretativen Soziologie betrachtet (vgl. Suchman 1987). Gegenstand ihrer Studie sind interaktive Artefakte, d.h. die Mensch/Computer-Interaktion, und ihre Argumentationsstrategie besteht darin, das Handlungsmodell der Künstlichen Intelligenz mit jenem der Ethnomethodologie zu konfrontieren. Die Tatsache, daß es der Künstlichen Intelligenz bislang nur sehr beschränkt gelungen ist, Alltagshandeln zu simulieren, hat seinen Grund in einem inadäquaten Handlungsmodell. Das ist das Fazit aus Lucy Suchmans Diskussion der handlungstheoretischen Voraussetzungen der Mensch/Maschine-Interaktion. Solange man Handeln, wie

27 In einem späteren Buch, das Dreyfus zusammen mit seinem Bruder verfaßt hat, weitet er seine Wissenstypologie zu einem Lernmodell aus, das verschiedene Stufen menschlicher Expertise unterscheidet – angefangen beim 'know-that' der untersten Stufe, auf der sich das Wissensgebiet dem Anfänger als Ensemble von Fakten und expliziten Regeln präsentiert, bis hin zum verinnerlichten 'know-how' der obersten Stufe. Wer lernt und Fertigkeiten erwirbt, durchläuft sukzessiv diese fünf Stufen, bis er, im Idealfall, auf der obersten Kompetenzstufe angelangt ist, jener Stufe, auf der das Wissen in hohem Maße verinnerlicht und teilweise sogar 'verkörperlicht' ist (Dreyfus/Dreyfus 1987).

es in der KI die Regel ist, als Ausführen eines vorgängig entwickelten Planes konzeptualisiert und dabei von der prinzipiellen Kontextabhängigkeit des menschlichen Handelns abstrahiert, wird es nicht möglich sein, wirklich 'interaktive' Programme zu entwickeln. Menschliches Handeln – und dies gilt gleichermaßen für instrumentelles wie für kommunikatives Handeln – ist prinzipiell offen und kontextabhängig (und deshalb niemals vollständig simulierbar). Handeln ist immer '*situated* action', sowohl was den *Verlauf* einer Handlung wie auch ihre *Interpretation* anbelangt. Wenn wir handeln, folgen wir in der Regel nicht einem detaillierten Plan, sondern reagieren auf die konkreten Umstände der Situation, die wir niemals vollständig zu antizipieren vermögen. Und ähnlich erschließt sich die Bedeutung einer (Sprech-)Handlung nur über den Kontext, in dem sie stattgefunden hat: »Human behavior is a figure defined by its ground« (Suchman 1987: 43). Pläne sind für das Handeln selbst nicht konstitutiv, sie werden höchstens beigezogen, um es nachträglich zu erklären. Erst wenn das Handeln problematisch wird, versuchen wir ihm bewußt eine rationale Struktur zu unterlegen: »It is only when we are pressed to account for the rationality of our actions (...) that we invoke the guidance of a plan.« (Suchman 1987: ix)[28]

Das Handlungsmodell der Interpretativen Soziologie hilft auch zu verstehen, weshalb sich die Hoffnung der KI, das Problem des Erfahrungswissens mit Hilfe des 'Rahmen'-Konzeptes zu lösen, nicht erfüllt hat. In den frühen 70er Jahren wurde in der KI ein neuer Ansatz zur Wissensrepräsentation formuliert (Boden 1987: 305ff.; Becker 1992: 77ff.). Marvin Minsky und Robert Schank, die die diesen Ansatz maßgeblich entwickelt haben, gingen dabei von der Annahme aus, daß die Alltagswelt in typisierte Situationen gegliedert ist, die sich je einzeln erschöpfend beschreiben lassen. Individuen orientieren sich in diesen 'Mikrowelten' anhand von spezialisiertem und situationsspezifischem Wissen. Marvin Minsky hat solche typisierten Wissensbestände als 'Rahmen' bezeichnet, Robert Schank nannte sie 'Skripts'. Ein 'Rahmen' ist in der Definition von Marvin Minsky »a data-structure for representing a stereotyped situation, like being in a certain kind of living room, or go-

28 Die berühmte Monographie von Miller/Galanter/Pribram *Plans and the Structure of Behavior*, die 1960 erschien, hat der Künstlichen Intelligenz damals die handlungstheoretische Grundlage geliefert. Die konkreten Projekte der KI haben sich zwar schon vorher am Planmodell orientiert, das bekannteste Beispiel dafür ist das GPS-Programm (=*General Problem Solver* ), das Newell und Simon 1957 entwickelt haben, doch erst mit dem Buch von Miller/Galanter/Pribram hat das Planmodell der KI eine systematische theoretische Fundierung erhalten.

ing to a child's birthday party. Attached to each frame are several kinds of information. Some of this information is about how to use the frame. Some is about what one can expect to happen next. Some is about what to do if these expectations are not confirmed.« (Minksy 1975: 96) Entsprechend gibt es Rahmen für jede erdenkliche Alltagssituation – für den Kinobesuch und für das Auftreten in der Öffentlichkeit, für Krankenbesuche und für den Kirchgang.[29]

Mit seinem Rahmen-Ansatz hat Minsky versucht, der Kontextbezogenheit des Wissens Rechnung zu tragen und es gleichzeitig in eine handhabbare Form zu bringen. Trotz gewaltiger Anstrengungen hat sich die formale Darstellung des Alltagswissen jedoch als schwieriger erwiesen, als man es sich in den 70er Jahren vorgestellt hatte. Der Grund dafür ist nicht ein 'Management-Problem', wie Minsky meint (Görz 1987: 189), sondern hat mit den handlungstheoretischen Prämissen dieses Ansatzes zu tun. Wie Erving Goffman gezeigt hat, wird die soziale Wirklichkeit tatsächlich in Form von 'Rahmen' organisiert, wie auch Goffman diese typisierten Handlungszusammenhänge nennt, doch sind solche 'Rahmen' weder isolierte noch objektivierbare Welten (Goffman 1977). Vielmehr sind sie 'Verdichtungen' innerhalb eines Gesamtzusammenhanges, deren Inhalt und deren Grenzen permanent neu erzeugt und damit ständig verändert werden (vgl. auch Suchman 1987: 42ff.).

Bis vor kurzem war der Streit um die Künstliche Intelligenz ein Streit, der praktisch unter Ausschluß der Soziologie stattfand. Wenn sich Soziologen und Soziologinnen zu Worte meldeten, dann nur an den Rändern der Debatte. Ähnlich wie in der Wissenschaftssoziologie, wo das 'Innenleben' der Wissenschaft lange Zeit als 'black box' behandelt wurde (vgl. Kap. 3.1.), gab es kaum Ansätze zu einer wissenssoziologischen Betrachtung der Künstlichen Intelligenz: Fragen, die sich auf die *Inhalte* der KI und ihre Grundannahmen bezogen, wurden der Philosophie und Psychologie zur Antwort überlassen. Dies hat sich in den letzten Jahren geändert. In letzter Zeit sind einige soziologische Arbeiten zur KI erschienen,

---

29 Manchmal werden solche typischen Erwartungen allerdings auch enttäuscht: »Man hatte immer gedacht, daß Pfarrer Männer sind. Nun stellt man fest: dieser Pfarrer ist eine Frau.« Während es Luhmann offensichtlich leicht fällt, mit diesem außergewöhnlichen Ereignis umzugehen: »Soll man Pfarrin sagen? Handkuß?« wird ein Programm, das mit einer ähnlich unerwarteten Situation konfrontiert ist, vermutlich kaum so flexibel reagieren (Luhmann 1984: 103).

die sich allerdings thematisch (und nicht zuletzt auch in ihrer Qualität) erheblich voneinander unterscheiden.[30]

Es geht mir im folgenden aber nicht darum, einen Überblick zu geben über die verschiedenen möglichen soziologischen Perspektiven auf die KI oder darzustellen, wie eine soziologische Kritik aussehen müßte (vgl. dazu v.a. Suchman 1987). Statt dessen möchte ich zum Schluß noch einmal auf die eingangs gestellte Frage zurückkommen: Was sind die Voraussetzungen für den gesellschaftlichen Erfolg künstlicher Intelligenz? Im Gegensatz zur Fragestellung der Philosophie geht es mir nicht um die Suche nach einem absoluten Standard, anhand dessen man ein für allemal die Grundmerkmale der Mensch/Maschine-Differenz fixieren könnte, sondern um die (Doppel-)Frage, unter welchen *sozialen* Voraussetzungen einem Programm Intelligenz *zugeschrieben* wird. Der gesellschaftliche Erfolg der Künstlichen Intelligenz ist nicht so sehr eine technische als vielmehr eine soziale Angelegenheit. Die Antwort auf die Frage nach der Zukunft der Künstlichen Intelligenz ist deshalb auch weniger in den Programmen selbst zu suchen als in der sozialen Definitionspraxis ihrer Benutzer (1) und in den Eigenschaften jener, die simuliert werden (2).

(1) Am Beispiel des ELIZA-Programms läßt sich auf exemplarische Weise zeigen, in welchem Ausmaß die 'Intelligenz' von Programmen eine Leistung ihrer Benutzer ist und welche Mechanismen diesem Zuschreibungsprozeß zugrunde liegen. In Joseph Weizenbaums Sicht sind es die Projektionen der Benutzer, die der Verwechslung von Mensch und Programm zugrunde liegen: »Der 'Sinn' und die Kontinuität, die die mit ELIZA sprechende Person wahrnimmt, werden weitgehend von dieser selbst hergestellt. Von ihr gehen die Bedeutungen und Interpretationen dessen aus, was ELIZA 'sagt'.« (Weizenbaum 1978: 253) Das Programm selbst ist bloß eine »Syntaxmaschine« (Fodor), die Semantik stammt von den Benutzern. Es sind ihre Projektionen, die ELIZA den Turingtest bestehen lassen.[31]

---

30 Studien, die die Künstliche Intelligenz aus einer wissenssoziologischen Perspektive betrachten, ähnlich wie es die neuere Wissenschaftssoziologie für die Wissenschaft tut, sind allerdings immer noch eine Seltenheit. Ein wissenssoziologischer Blick auf die KI wird zwar von verschiedenen Autoren gefordert (u.a. Woolgar 1985; Bloomfield 1987), aber nur zum Teil praktisch eingelöst (Collins 1990).

31 Ähnlich argumentiert auch H.M. Collins (Collins 1990). Die Fähigkeiten, die wir Computern – und technischen Artefakten überhaupt – zuschreiben, verdanken sich zu einem großen Teil den menschlichen Kompensationsleistungen. Wenn die Benutzer nicht – und meistens von ihnen selbst unbemerkt – Defizite ausgleichen, Lücken füllen, Aufgaben zu Ende führen würden, dann würden die meisten technischen Artefakte nicht die Leistungen erbringen, die wir ihnen zuschreiben. Dies

Weizenbaum spricht damit einen Mechanismus an, der aus der Sicht der Ethnomethodologie zu den Basismethoden des praktischen Handelns gehört. Harold Garfinkel bezeichnet dieses Verfahren (das auch ein spezifisch sozialwissenschaftliches ist) als 'dokumentarische Methode der Interpretation' (Garfinkel 1967: 76ff.). Die dokumentarische Methode der Interpretation ist genau das, was wir beim Imitationsspiel tun, wenn wir aufgrund des Verhaltens unseres Gegenübers auf dessen Gedanken schließen und diese wiederum herbeiziehen, um sein Verhalten zu erklären. Oder allgemeiner formuliert: Bei der dokumentarischen Methode wird nicht nur das »zugrundeliegende Muster von seinen individuellen dokumentarischen Belegen abgeleitet, sondern umgekehrt auch werden die individuellen dokumentarischen Zeugnisse auf der Grundlage dessen interpretiert, 'was bekannt ist' über das zugrundeliegende Muster. Jede der beiden Seite wird benutzt, um die je andere auszuarbeiten.« (Garfinkel 1973: 199).[32]

Als Weizenbaum sein ELIZA-Programm entwickelte, hat er genau diesen Mechanismus ausgenutzt (ohne ihn vermutlich theoretisch zu kennen): Das psychotherapeutische Setting ist eine Kommunikationssituation, bei der die Fingierung von Nichtwissen gewissermaßen zum professionellen Rüstzeug gehört. Wenn man einem Therapeuten erzählt 'Ich habe eine lange Bootsfahrt gemacht', und er darauf antwortet: 'Erzählen Sie mir mehr über Boote', so schließt man daraus nicht etwa auf Unwissenheit, sondern auf einen bedeutungsvollen Hintergedanken. »It is important to note«, so Weizenbaum, »that this assumption is made by the *speaker.*« Es ist der Klient, der seinem Therapeuten Tiefsinn unterstellt (und nicht, wie er es sonst wohl tun würde, Beschränktheit). Was auch immer der Therapeut (oder ELIZA) sagt, wird als Ausdruck einer reichen Gedankenwelt interpretiert, und diese (unterstellte) Gedankenwelt wird ihrerseits herbeigezogen, um die unter Umständen

---

bestätigt von einer anderen Seite her noch einmal, was ich im Zusammenhang mit der 'formalistischen' These in der Techniksoziologie ausgeführt habe (vgl. Kap. 7). Der Umgang mit Artefakten läßt sich nicht reduzieren auf formale Regeln. Technikbezogenes Handeln setzt mehr voraus, als in den Gebrauchsanleitungen festgeschrieben ist.

32 Garfinkel bezieht sich dabei auf Karl Mannheim, der diesen Begriff im Zusammenhang mit seiner Interpretationstheorie eingeführt hat, ohne jedoch Mannheims Unterscheidung von drei Sinnschichten zu übernehmen (vgl. Mannheim 1921: insb. 103ff.). Diese etwas unterschiedliche Akzentsetzung spielt jedoch für meinen Zusammenhang keine Rolle. Ich verwende im folgenden den Begriff, wie ihn Garfinkel gebraucht.

reichlich lapidaren Äußerungen des Therapeuten mit Bedeutung zu versehen (Weizenbaum 1966: 26).

Das Prinzip der dokumentarischen Methode der Interpretation hilft den Mechanismus zu verstehen, aufgrund dessen wir Programmen und Maschinen Intelligenz (Verstehen, Interaktivität, Rationalität etc.) zuschreiben. Sie erklärt aber nicht, unter welchen Voraussetzungen dies konkret geschieht – wann wir mit anderen Worten den Outprint von ELIZA als verständnisvolle Äußerungen interpretieren und wann als bloße Zeichenfolge. Daniel Dennett 1971 hat (in einem allerdings etwas anderen theoretischen Zusammenhang) eine solche Sinnzuschreibung als 'intentionale Erklärung' bezeichnet und sie abgegrenzt von zwei anderen Erklärungsweisen – der funktionalen und der physikalischen Erklärung (vgl. S. 255f.). Im Mittelpunkt seiner Überlegungen steht die Frage, unter welchen Voraussetzungen es legitim ist, einem System Intentionalität zuzuschreiben, also Ziele, Meinungen, Wünsche etc. Was aus philosophischer Perspektive vielleicht unangemessen sein mag, ist jedoch im Alltag äusserst praktisch: Intentionale Erklärungen haben gegenüber funktionalen und erst recht gegenüber physikalischen Erklärungen den Vorzug, daß sie einfach sind, und das zahlt sich insbesondere bei Systemen aus, die so komplex sind wie ein moderner Computer (oder ein Mensch).

Wer ein Verhalten intentional erklärt, muß nicht unbedingt der Meinung sein, das betreffende System habe tatsächlich Meinungen und Wünsche. Eine 'intentionale Erklärung' meint bei Dennett nur ein methodisches Prinzip (und nicht eine entsprechende ontologische Annahme). Dieser feine, aber gewichtige Unterschied wird im Alltag allerdings nicht immer aufrechterhalten. Der Grund dafür liegt nicht zuletzt im Interpretationsverfahren der dokumentarischen Methode und der damit verbundenen Tendenz, der Wirklichkeit eine Sinnstruktur zu unterlegen. Dies veranschaulichen Suzanne Kessler und Wendy McKenna 1978 an einem Geschlechter-Fragespiel, das Garfinkels berühmten Beratungsexperiment nachgebildet ist (Garfinkel 1967: 79ff.). Es geht bei diesem Spiel darum, das Geschlecht einer Person zu erraten, und zwar mittels Fragen, auf die die Auskunftsperson mit 'ja' oder 'nein' antworten kann. Die Pointe des Experiments besteht darin, daß die Antworten mit den Fragen nichts zu tun haben, sondern nach einem Zufallsprinzip gegeben werden. Obwohl die Antworten entsprechend widersprüchlich ausfielen, wurde jede Erwiderung, wie absurd und inkonsistent sie auch immer war, als eine sinnvolle Antwort interpretiert und zu erklären versucht.

Ähnlich wie Garfinkels Beratungsexperiment zeigt das Geschlechter-Ratespiel, in welchem Ausmaß sich die sinnhafte Ordnung der Welt den interpretativen Leistungen der Handelnden verdankt. Dies gilt erst recht für die Mensch/Computer-Interaktion. Wie das ELIZA-Beispiel zeigt, gibt es eine Mensch/Computer-Kommunikation, »but not because of any subtle interpretative powers within the program, but because of the flexibility and repertoire of interpretative tactics available to the human participant« (Oldman/Drucker 1985: 156). Aus diesem Grund ist die Antwort auf die Frage 'Können Maschinen denken?' auch nicht bei den Programmen selbst zu suchen, sondern bei den Benutzern. D.h. anstatt darüber nachzudenken, ob Programme intelligent sein können, rückt eine soziologische Perspektive die alte Turingfrage wieder in den Mittelpunkt: Unter welchen Bedingungen wird Menschen oder Maschinen Intelligenz (Rationalität, Empathie, Interaktivität etc.) *zugeschrieben*? Damit verlagert sich der Erklärungsfokus weg von den Maschinen und hin zum sozialen Umfeld, in dem sie eingebettet sind (vgl. auch Schwartz 1989).

(2) Theoretisch wird dieser Perspektivenwechsel auch durch die Turingthese nahegelegt. Turing hat 1936 überzeugend dargelegt, daß die Simulationsfähigkeit einer Turingmaschine (bzw. eines Computers) mit maschineller 'Intelligenz' nichts zu tun hat (vgl. Kap. 2). Er hat den Blick darauf gelenkt, daß nicht das Verhalten der Maschine der entscheidende Punkt ist, sondern jenes der Menschen. Nur wo Menschen sich mechanisch verhalten, ist ihr Verhalten auch simulierbar. Das ist das Fazit der Turingthese, und daraus ergibt sich eine zweite Voraussetzung für den gesellschaftlichen Erfolg der Künstlichen Intelligenz.

Der Computer in Turings Imitationsspiel hat im Prinzip zwei Möglichkeiten, das Spiel zu gewinnen: Entweder er verhält sich wie ein Mensch – oder aber der Mensch wie eine Maschine. Der Weg zur Austauschbarkeit von Mensch und Maschine führt weniger von der Maschine hin zum Menschen als vielmehr über ein menschliches Verhalten, das immer maschinenähnlichere Züge annimmt.[33] Das ist die Argumenta-

---

33 Daß dies keineswegs metaphorisch gemeint ist, habe ich in Kapitel 4 zu zeigen versucht. Im Zuge der formalen Rationalisierung wurde der 'maschinenhafte' Charakter des menschlichen Handelns zu einem zunehmend realen – und breit diskutierten – Phänomen. Die tayloristische Normierung von spontanen Bewegungsabläufen ist nur das augenfälligste Beispiel dafür. Heute, im Zeitalter der Computerisierung, ist diese Schematisierung des menschlichen Handelns bereits so alltäglich, daß kaum mehr Notiz davon genommen wird. Ein Beispiel: Um das maschinelle Übersetzen zu erleichtern, verlangen immer mehr Firmen von ihren Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen, Texte in einer weitgehend standardisierten Sprache abzufassen. Das Grundprin-

tionslinie, die H.M. Collins in seinem Buch *Artificial Experts* verfolgt. Da seine Überlegungen in eine ähnliche Richtung weisen wie die Position, die ich hier vertrete, möchte ich sie etwas ausführlicher vorstellen. Wenn auch etwas umständlich formuliert, machen Collins Ausführungen plastisch, was Turing sehr viel abstrakter und präziser auch dargelegt hat.[34]

Collins unterscheidet zunächst einmal zwischen Handeln (acts, actions) und Verhalten (behavior). Mit *Handeln* ist sinnhaftes Handeln gemeint im Sinne von Weber, während *Verhalten* zum einen ein reaktives Sich-Verhalten meint, zum anderen, und das ist für die weiteren Ausführungen entscheidend, die gewissermaßen materielle Seite einer Handlung. »I use«, so Collins Formulierung, »the term behavior in a slightly extended way to refer not only to unintended movements such as blinks, reflexes, and other involuntary movements, but also to the physical counterpart of action. Thus, in my terminology, it makes sense to say that the behavioral counterpart of a wink and a blink are the same – a certain jerky movement of the eyelid; it is just that in the case of the wink the behavior was the consequence of an act, whereas in the other case, no action was involved.« (Collins 1990: 30)

Mit dieser Unterscheidung von intentionalem Handeln (action) und seinem materiellen Träger (behavior) knüpft Collins an eine geläufige Differenzierung an (vgl. dazu u.a. Searle 1986: 56ff.; Searle 1987, insb. Kap. 3). Der für die weitere Argumentation entscheidende Punkt ist der, daß dieselbe Intention durch verschiedene Körperbewegungen realisiert werden kann, und umgekehrt dieselbe Körperbewegung unterschiedliche Intentionen repräsentieren kann. Wer über die Straße rennt, kann dies mit verschiedenen Absichten tun – weil eine Freundin auf der anderen Straßenseite winkt, um vor jemanden wegzulaufen oder einfach gesundheitshalber. Dasselbe Verhalten (behavior) kann verschiedene Handlungen (action) repräsentieren, und umgekehrt kann dieselbe Handlung

zip ist Einfachheit und Eindeutigkeit: kurze Sätze; Vermeiden von Synonymen; beschränktes Vokabular; Vermeiden von Wörtern, die mehrere Bedeutungsvarianten haben können (z.B. 'Bank'); Vermeiden von Unklarheiten, indem z.B. Substantive wiederholt werden anstatt sie durch Pronomen zu ersetzen etc. (Collins 1990: 223). Damit der Computer irgendwann für die Übersetzungsarbeit eingesetzt werden kann, wird das menschliche Handeln bereits vorher seinem Funktionsprinzip angepaßt.

34 Collins hat seine Argumentation offensichtlich ohne Kenntnis der mathematischen Berechenbarkeitsdiskussion entwickelt. Er bezieht sich jedenfalls nirgendwo auf die Arbeiten von Turing. Seine Argumentation ließe sich allerdings beträchtlich vereinfachen, wenn man sie in Termini des Turingmodells formulieren würde.

durch sehr verschiedene Bewegungsabläufe praktisch verwirklicht sein. Die entscheidende Differenz zwischen Handlung und Verhalten ist, so Collins zusammenfassend: "(i) the same piece of behavior may represent different acts; (ii) the same act may be executed or (to use computer jargon), 'instantiated' by many different behaviors.« (Collins 1990: 32)

Oft ist nicht fixiert, wie eine Handlung realisiert werden soll. Es gibt aber Situationen, in denen genau festgelegt ist, wie eine Handlung auszuführen ist – Situationen, in denen man sein Verhalten, freiwillig oder unter Zwang, an klaren Regeln orientiert. Handlungen, die immer auf *dieselbe* Weise ausgeführt werden, nennt Collins »behavior-specific acts« oder, treffender, »machine-like acts«. 'Machine-like acts' sind, so Collins Definition, »acts that humans always try to instantiate with the same behavior« (Collins 1990: 33). Maschinenhafte Handlungen sind Handlungen, bei denen eine Handlung (act) durch immer dasselbe Verhalten (behavior) realisiert wird, Handlungen, bei deren Ausführung es keinen Spielraum gibt. Jeder einzelne Schritt ist bis ins Detail festgelegt. Die Normierung von Bewegungsabläufen im Taylorismus ist das klassische Beispiel dafür.

Mit seiner 'Wissenschaftlichen Betriebsführung' hat Frederick W. Taylor gezeigt, daß sich Handlungen normieren, d.h. in eine spezifische – und unter dem Gesichtspunkt der Effizienz – optimale Verhaltenssequenz einordnen lassen (vgl. Kap. 4). Was durch die Rationalisierungsanalyse herausgefiltert wird, ist eine durchstrukturierte Bewegungssequenz, bei der, wie Taylor schreibt, »alle nutzlosen Bewegungen vermieden« und »umständliche und zeitraubende Handgriffe durch einfache und zeitsparende« ersetzt werden – eine optimale und bis ins Einzelne vorgeschriebene Abfolge von Bewegungen, die anschließend zum Verhaltensstandard wird (Taylor 1911: 84; 126). Diese »beste Methode« legt ein für allemal fest, wie eine Handlung auszuführen ist. Nach Abschluß der tayloristischen Inspektion sind alle anderen Möglichkeiten, Roheisen zu laden (44ff.), Erde zu schaufeln (67ff.) oder Ziegel zu verlegen (80ff.) aus dem erlaubten Verhaltensrepertoire ausgemerzt.[35]

35 Um Ziegel zu verlegen, so eines der Trivialbeispiele aus Taylors *Wissenschaftlicher Betriebsführung*, holt man im allgemeinen zuerst mit der rechten Hand einen Ziegel und drückt ihn an. Dann wechselt man die Hand und hält nun den Ziegel mit der linken Hand fest, während man mit der rechten Hand den Mörtel nimmt. Die gleiche Handlung läßt sich aber auch auf sehr viel »sparsamere« Weise erledigen: Man faßt den Ziegel mit der linken Hand und mit der rechten hält man die Kelle (Taylor 1911: 83f.).

Ein anderer klassischer Ort 'maschinenhaften' Handeln ist das Militär (und die Tanzrevue). Nicht von ungefähr wurden die Revuegirls der 20er Jahre als »Girlsmaschine« bezeichnet (vgl. Kap. 4). Im Idealfall wird das Verhalten des Arbeiters (des Soldaten, der Tänzerin) so weit rationalisiert und diszipliniert, daß es von außen betrachtet keinen Unterschied macht, ob nun ein Mensch die Arbeit ausführt oder eine Maschine. »Ideally, the outside observer would be unable to tell whether it was a human, or a machine disguised as a human, that was performing the task.« (Collins 1990: 34) Zwischen einem maschinenhaften, einem 'technisierten' menschlichen Handeln und seiner maschinellen Durchführung besteht von außen betrachtet keine prinzipielle Differenz (vgl. Kap. 7).

Was Collins 'maschinenhaftes' Handeln nennt, entspricht jener Handlungsform, die ich als *algorithmische* bezeichnet habe.[36] Ein Algorithmus ist eine Vorschrift, bei der bis ins Detail festgelegt ist, welche Schritte in welcher Reihenfolge durchzuführen sind (vgl. S. 71f.). Das Befolgen eines Algorithmus ist ein Prozeß, dessen Ausführung keine Abweichung erlaubt: es gibt immer nur *eine* Möglichkeit, *einen* Weg, einen Algorithmus auszuführen. »In performing the steps, we are simply following the instructions like robots«, wie Stephen C. Kleene den Zwangscharakter des algorithmischen Handelns beschreibt (Kleene 1988: 18). Die Art und Weise der Ausführung ist von vornherein festgelegt. Es gibt keine Wahlmöglichkeiten, keinen Handlungsspielraum mehr. Wer einem Algorithmus folgt, muß »sklavisch nach den ihm gegebenen Vorschriften arbeiten, die alles bis ins kleinste regeln« (Hermes 1978: 1). Deshalb kam Emil Post ein Fließbandarbeiter in den Sinn, als er über den Algorithmus-Begriff nachdachte, und Alan Turing eine Maschine.

Die Handlungstypologie, die Collins entwickelt, hat die Funktion, die Reichweite und die Grenzen maschineller Intelligenz abzustecken, ganz ähnlich wie es auch Hubert Dreyfus mit seiner Wissenstypologie bezweckte. Im Unterschied zu Dreyfus setzt Collins jedoch nicht beim Wissen an, sondern beim Verhalten: »I replace the dichotomy of knowledge types with a dichotomy of human action – regular action and behavior-

36 Collins führt den Begriff des 'maschinenhaften' Handelns zwar am Beispiel von Körperbewegungen ein, zeigt aber anschließend, daß er nicht darauf beschränkt ist. Auch mentale Akte können 'behavior-specific acts' sein: Es gibt immer nur *eine* Möglichkeit, zwei Zahlen zu addieren, und es spielt im Prinzip keine Rolle, ob man mit den Fingern rechnet oder im Kopf (vgl. Collins 1990: 46ff.). Was Collins relativ umständlich am Beispiel des Rechnens zeigt, daß nämlich auch mentale Prozesse im tayloristischen Sinne 'methodisch' sein können, ließe sich über den Algorithmus-Begriff sehr viel präziser fassen.

specific action. This explains what computers can do and what they cannot do, but it leaves room for them to creep across the boundary by incremental growth.« (Collins 1990: 216) Jede Handlung, deren Ausführung auf immer dieselbe Weise erfolgt, ist im Prinzip auch mechanisierbar – das ist die Kernaussage der 'Collins-These'. »Just when humans engage in behavior-specific acts they can be mimicked by machines.« (Collins 1990: 41) Wann immer wir uns wie Maschinen verhalten, sind wir auch durch Maschinen ersetzbar.

Eine maschinenhafte Handlung ist in den Augen von Collins allerdings immer noch eine Handlung (act) und nicht nur ein Sich-Verhalten – »because they could have been carried out in another way« (Collins 1990: 33). Diese Fähigkeit, bewußt anders zu handeln als erwartet, die Kontingenz des Handelns mit anderen Worten, unterscheidet ein noch so mechanisches menschliches Handeln von einer maschinellen Operation - allerdings nur vom Standpunkt des handelnden Subjekts aus betrachtet. Von außen gesehen macht es keinen Unterschied, ob eine Maschine die Handlung ausführt oder ein Mensch (vgl. Kap. 7). Andernfalls verlöre auch Turings These, daß jedes 'maschinenhafte' menschliche Handeln mechanisiert werden kann, jegliche Plausibilität.

Eine maschinenhafte Handlung – ein 'machine-like act' – ist eine Handlung, die einer klaren Vorschrift, einem Algorithmus folgt. Weshalb eine solche 'maschinenhafte' Handlung im Prinzip auch von einer Maschine ausgeführt werden kann, das hat Turing überzeugend dargelegt. Erst vor diesem Hintergrund gewinnt Collins metaphorische Aussage: »Whenever we choose to mimic a thing, a thing can mimic us« (Collins 1990: 216), ihren präzisen Sinn. Turings Überlegungen zeigen meiner Ansicht nach die Richtung an, die eine soziologische Diskussion der Computerisierung nehmen müßte, finde diese nun im Kontext der Industriesoziologie, der Techniksoziologie oder im Rahmen der Debatte um die Künstliche Intelligenz statt. Anstatt die Maschinen in den Mittelpunkt zu rücken, müßte sie bei den Menschen ansetzen und dem 'mechanischen' Charakter ihres Handelns. Was dies jenseits aller Metaphorik heißt und was es praktisch bedeutet, hat Taylor auf folgenreiche Weise vorgeführt und Collins mit seiner Kategorie des 'maschinenhaften Handelns' begrifflich einzufangen versucht (Collins 1990: 221). Eine 'Soziologie des Computers' hat, anders formuliert, an der Maschinenhaftigkeit des menschlichen Verhaltens anzusetzen - bzw. an den sozialen Bedingungen, die dazu führen - und nicht, wie einige Soziologen heute (und etwas allzu leichtgläubig) meinen, an der Menschenähnlichkeit des Computers.[37]

Zu den Grundüberzeugungen der Soziologie gehört die Annahme, daß sich menschliches Handeln aufgrund seiner sozialen und kontingenten Natur von jenem einer Maschine (oder eines Tieres) grundlegend unterscheidet. Das Aufkommen von Maschinen, die intelligentes und interaktives Verhalten zu zeigen scheinen, hat bei einigen Soziologen und Soziologinnen dazu geführt, hinter diese Grundannahme ein Fragezeichen zu setzen. Für Alan Wolfe ist die Künstliche Intelligenz ein Gedankenexperiment, »an effort to pose a series of interrelated 'what if' questions (...) What if the duality between the natural and the artifical that has shaped sociological thought is wrong?« (Wolfe 1991: 1074) Während Wolfe zum Schluß gelangt, daß die bisherige Entwicklung der KI die These einer Grunddifferenz zwischen Mensch und Maschine bestätigt habe, neigen andere Soziologen eher der anderen Seite zu. Für Steve Woolgar ist das Aufkommen von intelligenten Maschinen eine Bestätigung der wissenssoziologischen These, daß die Grenze zwischen dem Sozialen und dem Mechanischen, zwischen Mensch und Maschine eine sozial konstruierte ist. »The AI phenomenon«, so seine Argumentation, »provides an important occasion for reassessing one of the basic axioms of sociology, viz. the claim that there is a sense in which human behaviour can be understood as distinctively 'social'. AI provides the opportunity for reevaluating our preconceptions about behaviour, action, its origins and agency, and, most significantly, our attempts to understand. I suggest it is instructive to press closely the claim that there is something special about human behaviour (...) Given (...) the implicit assumption that virtually any activity can be analysed sociologically, it is interesting to ask why sociology should stop short when it comes to machines. How exactly do presumptions about the 'social' exclude machine-like activity from the purview of sociological investigation? Why not a sociology of machines?

37 Joerges 1989 spricht in diesem Zusammenhang von einer 'reenchantment von disenchantment' - von einer Wiederverzauberung der entzauberten rationalisierten Welt. Diese 'Romantisierung' des Computers ist für die (Technik-)Soziologie in einem doppelten Sinn problematisch: Die Computerfaszination hat zwar der Techniksoziologie eine neue Attraktivität verliehen, mit der Gefahr jedoch, daß sie faktisch zu einer Soziologie des Computers wird. Zum anderen wird mit dieser anthropomorphen Deutung des Computers das Selbstverständnis des Untersuchungsfeldes reproduziert (anstatt kritisch reflektiert): Die von interessierten Kreisen entwickelten Computerbilder prägen auch den Blick der Soziologen auf die neuen Maschinen.

Are artificially intelligent machines sufficiently like humans to be treated as the *subjects* of sociological inquiry?« (Woolgar 1985: 568)

Was Steve Woolgar noch als Frage stehenläßt, hat Hans Geser 1989 schon etwas entschiedener und mit größerem theoretischen Aufwand formuliert. Die Gründe allerdings, die er für seine Forderung anführt, den Computer soziologisch einzugemeinden, scheinen mir in sich nicht unbedingt stimmig zu sein. Auf der einen Seite begründet Geser seine These, die Mensch-Computer-Interaktion als soziales Handeln zu betrachten, mit dem Argument der induktiven Evidenz, wie ich es am Beispiel des Turingtests bereits vorgestellt habe: Auch im Falle des menschlichen Gegenübers ist Denk- und Deutungsfähigkeit niemals garantiert, sondern immer nur eine Unterstellung. Was wir dem Menschen zubilligen, sollten wir gerechterweise auch einer Maschine gegenüber tun, die sich in unseren Augen ähnlich verhält wie ein Mensch. Gleichzeitig argumentiert Geser aber auch objektivistisch, indem er dem Computer faktisch menschenähnliche Eigenschaften zuschreibt. Aus der Teilnehmerperspektive des Benutzers mag der Computer vielleicht tatsächlich Fähigkeiten aufweisen, wie sie sonst nur Menschen eigen sind, das heißt aber noch lange nicht, daß man ihm auch aus der Beobachterperspektive der Soziologie soziale Qualitäten zuschreiben sollte. Computer weisen, wie ich in Kapitel 2 ausführlich begründet habe, nicht die Eigenschaften auf, die sie aus der Perspektive der Interaktionstheorie zu sozialem Handeln befähigen würden – die Fähigkeit zu denken oder auch die Kompetenz, das eigene Verhalten aufgrund des erwarteten Verhaltens von alter auszuwählen.

Statt eine 'Soziologie des Computers' von den angeblich 'soziomorphen' Eigenschaften des Computers her zu entwickeln, müßte man meiner Ansicht nach gerade umgekehrt bei der Maschinenhaftigkeit des menschlichen Verhaltens ansetzen und bei dessen *sozialen Voraussetzungen*. Zwischen menschlichem und maschinellem Verhalten besteht unter Umständen tatsächlich nur eine geringe Differenz – aber nicht, weil der Computer faktisch subjektanaloge Qualitäten besitzt, sondern weil das menschliche Verhalten in bestimmten Handlungsfeldern ähnlich mechanisch und berechenbar ist wie jenes einer Maschine. Nur dort, wo das menschliche Handeln in Collins Terminologie 'maschinenhaft' ist, ist es auch mechanisierbar. Alan Turing hat in einer allgemein akzeptierten These die Behauptung aufgestellt, daß jedes menschliche Handeln, das klaren Regeln folgt, im Prinzip auch simulierbar ist. Was Turing als Regelfall postulierte, ist jedoch an spezifische soziale Bedingungen geknüpft, und es sind diese Bedingungen, die im Zentrum einer 'Soziologie des Computers' stehen müßten.

Computer sind nicht überall einsetzbar, sondern nur dort, wo sich Menschen in ihrem Verhalten an klare Regeln zu halten haben, in Handlungsbereichen mit anderen Worten, die bereits in starkem Ausmaß rationalisiert sind. Der Einsatz von Computern setzt, anders formuliert, jenen historischen Wandlungsprozeß voraus, der, wie ich in Kapitel 4 zu zeigen versucht habe, den Computer überhaupt erst *denkbar* gemacht hat. Die Computerisierung ist nicht der Anfang, sondern der vorläufige Endpunkt einer Entwicklung, die sehr viel früher begonnen hat, lange vor dem Einsatz der ersten Computer, und die zunächst dazu geführt hat, daß sich Menschen in zunehmendem Maße regelhaft – 'maschinenähnlich' – zu verhalten hatten. Max Webers Konzept der formalen Rationalisierung ist hier der Schlüsselbegriff. Bevor der Computer theoretisch überhaupt gedacht werden konnte, mußte formale Rationalität zu einem bestimmenden Merkmal der sozialen Wirklichkeit geworden sein.

Die formalistische Mathematik, an der sich Turing in seiner Arbeit orientierte, ist ähnlich wie die Kunst, die Musik oder auch die Soziologie dieser Zeit Ausdruck einer zunehmend rationalisierten und differenzierten Gesellschaft. Was auf der einen Seite erst die Erfahrungsbasis dafür geschaffen hat, daß der Computer überhaupt denkbar wurde, ist gleichzeitig auch die Voraussetzung für seine Verwendung. Ohne die tiefgreifende Umstrukturierung von Handlungsfeldern unter der Maxime der Regelhaftigkeit und Berechenbarkeit wäre nicht ein breites Spektrum menschlichen Handelns so weit normiert worden, daß seine maschinelle Imitation problemlos möglich wurde. Oder anders formuliert: Nur weil menschliches Handeln unter bestimmten Bedingungen tatsächlich mechanischen Charakter hat, konnten überhaupt Maschinen entwickelt werden, die den Anschein machen, intelligent zu sein.

# Danksagung

Diese Arbeit hat viele Wurzeln und ist von vielen Menschen inspiriert worden. Manche haben direkt zu ihr beigetragen, bei anderen liegt der Einfluß weiter zurück. Peter Heintz hat uns eindrucksvoll aufgezeigt, was soziologisches Denken heißt. Er hat mir den ersten soziologischen Blick auf die Welt vermittelt, auch wenn er mit dieser Arbeit wohl kaum einverstanden wäre. Ruedi Lüscher hat mich mit dem Projekt des Fordismus vertraut gemacht und mir gezeigt, daß sich ein maschineller Ablauf manchmal auch stoppen läßt. Beide sind gestorben, bevor ich mit dieser Arbeit begann.

Daß diese Arbeit überhaupt zustande kam, verdanke ich vor allem Hansjörg Siegenthaler und Rudolf Braun. Sie haben mich nicht nur intellektuell und emotional unterstützt, sondern mir auch materiell die Möglichkeit gegeben, meine Tätigkeit als Redaktorin aufzugeben und wieder an die Universität zurückzukehren. Hansjörg Siegenthaler hat sich immer wieder die Zeit genommen, mir herauszuhelfen, wenn ich mich im Dickicht fremder Gedanken verloren habe. Für seine hilfreichen Bemerkungen und kritischen Fragen danke ich ihm. Dank Jürgen Kocka habe ich die Möglichkeit gehabt, ein Jahr an der FU Berlin zu arbeiten. Ich habe in dieser Zeit, besonders auch von ihm, sehr viel gelernt. Danken möchte ich auch Claudia Honegger, die mir im letzten Jahr den Freiraum geschaffen hat, um diese Arbeit abzuschließen.

Mein Dank gilt auch all jenen, die diese Arbeit gelesen (und nicht allzu kritisch kommentiert haben): Joos Heintz, Matthias Kläy, Janos Makowsky und Alois Rust. Daß sie auch technisch zu einem Ende kam, verdanke ich Barbara Frikart, die mir die Finessen des praktischen Umgangs mit dem Computer beigebracht hat.

Mein größter Dank aber gilt Schimun Denoth. Er hat diese Arbeit von Beginn an begleitet, er ist alle Umwege, die ich gemacht habe, mit mir gegangen, und hat mir nicht nur technisch hochgeholfen, wenn ich, was oft geschah, in einen mathematischen Abgrund gestürzt bin. Für seine Unterstützung und seine Geduld auch in meinen ungeduldigen Momenten möchte ich ihm herzlich danken. Er und mein Bruder Joos Heintz haben

mir durch ihre Arbeit gezeigt, wie die Praxis der Mathematik aussieht. Über sie habe ich etwas von dem zu begreifen gelernt, was die Faszination der Mathematik ausmacht. Ihnen beiden ist dieses Buch gewidmet.

# Literaturverzeichnis

Das Literaturverzeichnis enthält nur jene Titel, die in dieser Arbeit explizit erwähnt werden. In der Regel habe ich das englische bzw. französische Original zitiert. Wo es mir wichtig schien, ist das Jahr der Erstveröffentlichung angegeben.


Aldcroft, Derek H. (1986), *The British Economy*. Vol. 1: The Years of Turmoil 1920 – 1951, Brighton

Allman, William F. (1990), *Menschliches Denken, Künstliche Intelligenz*. Von der Gehirnforschung zur nächsten Computer-Generation, München

Anderson, Alan Ross (Hrsg.) (1964), *Minds and Machines*, Englewood Cliffs, N.J.

Andersson, Gunnar (1988), *Kritik und Wissenschaftsgeschichte*. Kuhns, Lakatos' und Feyerabends Kritik des Kritischen Rationalismus, Tübingen

Aspray, William (Hrsg.) (1985a), *Proceedings of a Symposium on Large-Scale Digital Calculating Machinery (1948)*, Cambridge, Mass.

Aspray, William (1985b), *The Scientific Conceptualization of Information*, in: Annals of the History of Computing, 7, 2, S. 117 – 140

Aspray, William (1986), *International Diffusion of Computer Technology, 1945 – 1955*, in: Annals of the History of Computing, 8, 4, S. 351 – 360

Aspray, William (1990a), *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*, Cambridge, Mass.

Aspray, William (Hrsg.) (1990b), *Computing Before Computers*, Ames

Aspray, William (1990c), *Logic Machines*, in: ders. (Hrsg.), Computing Before Computers, Ames, S. 99 – 121

Babbage, Charles (1832), *On the Division of Mental Labour*, in: Philip Morrison und Emily Morrison (Hrsg.), Charles Babbage and his Calculating Engines. Selected Writing by Charles Babbage and Others, New York 1961, S. 315 – 321

Bachmann, Heinz (1983), *Der Weg der mathematischen Grundlagenforschung*, Bern

Baldamus, W. (1977), *Ludwik Fleck and the Development of the Sociology of Science*, in: Peter R. Gleichmann u.a. (Hrsg.), Human Figurations. Essays for Norbert Elias, Amsterdam, S. 135 – 156

Baldus, Richard (1921), *Mathematik und räumliche Anschauung*, in: Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, 30, 1. Abt., S. 1 – 15

Bammé, Arno u.a. (1983), *Maschinen-Menschen, Mensch-Maschinen*, Reinbek b. Hamburg

Barnes, Barry (1979), *Vicissitudes of Belief*, in: Social Studies of Science, 9, S. 247 - 263

Barnes, Barry, John Law (1976), *Whatever Should Be Done With Indexical Expressions?* in: Theory and Society, 3, S. 223 - 237

Barnes, Barry, Donald MacKenzie (1979), *On the Role of Interests in Scientific Change*, in: Roy Wallis (Hrsg.), On the Margins of Science: The Social Construction of Rejected Knowledge, Keele, S. 49 - 66

Bayer, Konrad (1985), *Sämtliche Werke*, Bd. 2, Wien

Bayertz, Kurt (1980), *Wissenschaft als historischer Prozeß*. Die antipositivistische Wende in der Wissenschaftstheorie, München

Becker, Barbara (1991), *Künstliche Intelligenz*, Frankfurt/M.

Behmann, Heinrich (1922), *Beiträge zur Algebra der Logik, insbesondere zum Entscheidungsproblem*, in: Mathematische Annalen, 86, S. 163 - 229

Bernays, Paul (1922), *Die Bedeutung Hilberts für die Philosophie der Mathematik*, in: Die Naturwissenschaften, 10, 4, Sonderheft: David Hilbert zur Feier seines sechzigsten Geburtstages, S. 93 - 99

Bernays, Paul (1930), *Die Philosophie der Mathematik und die Hilbertsche Beweistheorie*, in: ders., Abhandlungen zur Philosophie der Mathematik, Darmstadt 1976, S. 17 - 61

Bernays, Paul (1935), *Hilberts Untersuchungen über die Grundlagen der Mathematik*, in: David Hilbert, Gesammelte Abhandlungen, Bd. 3, Berlin, S. 196 - 216

Bernays, Paul (1950), *Mathematische Existenz und Widerspruchsfreiheit*, in: ders., Abhandlungen zur Philosophie der Mathematik, Darmstadt 1976, S. 92 - 106

Bieri, Peter (Hrsg.) (1981), *Analytische Philosophie des Geistes*, Königstein/Ts.

Bijker, Wiebe E. u.a. (Hrsg.) (1987), *The Social Construction of Technological Systems*. New Directions in the Sociology and History of Technology, Cambridge, Mass.

Bijker, Wiebe E., John Law (Hrsg.) (1992), *Shaping Technology/Building Society*. Studies in Sociotechnical Change, Cambridge, Mass.

Bittorf, Wilhelm (1956), *Automation*. Die zweite industrielle Revolution, Darmstadt

Block, Ned (1978), *Troubles With Functionalism*, in: C. Wade Savage (Hrsg.), Perception and Cognition. Issues in the Foundations of Psychology, Minneapolis, S. 261 - 325, dt. in: Dieter Münch (Hrsg.), Kognitionswissenschaft, Frankfurt/M. 1992, S. 159 - 224

Bloomfield, Brian P. (1987), *The Culture of Artificial Intelligence*, in: ders. (Hrsg.), The Question of Artificial Intelligence: Philosophical and Sociological Perspectives, London, S. 59 - 105

Bloor, David (1973), *Wittgenstein and Mannheim on the Sociology of Mathematics*, in: Studies in History and Philosophy of Science, 4, 2, S. 173 - 191

Bloor, David (1976), *Knowledge and Social Imagery*, London

Bloor, David (1981), *The Strengths of the Strong Programme*, in: Philosophy of the Social Sciences, 11, S. 199 – 213

Bloor, David (1982), *Durkheim and Mauss Revisited: Classification and the Sociology of Knowledge*, in: Studies in History and Philosophy of Science, 13, 4, S. 267 – 297; dt. in: Nico Stehr und Volker Meja (Hrsg.), Wissenssoziologie, Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie 1980, Sonderheft 22, S. 20 – 51

Bloor, David (1983), *Wittgenstein. A Social Theory of Knowledge*, London

Blumenthal, Otto (1922), *David Hilbert*, in: Die Naturwissenschaften, 10, 4, Sonderheft: David Hilbert zur Feier seines sechzigsten Geburtstages, S. 62 – 72

Blumenthal, Otto (1935), *Lebensgeschichte*, in: David Hilbert, Gesammelte Abhandlungen, Bd. 3, Berlin, S. 388 – 429

Boden Margaret A. (1987), *Artificial Intelligence and Natural Man*, Cambridge, Mass.

Bolter, David J. (1986), *Turing's Man.* Western Culture in the Computer Age, Harmondsworth

Bourbaki, Nicolas (1977), *Note Historique*, in: dies., Théorie des Ensembles, Paris, E IV. 33 – E IV. 79

Bourbaki, Nicolas (1982), *Die Architektur der Mathematik*, in: Christian Thiel (Hrsg.), Erkenntnistheoretische Grundlagen der Mathematik, Hildesheim, S. 288 – 301

Bromley, Allan G. (1983), *What Defines a 'General Purpose Computer'?* in: Annals of the History of Computing, 5, 3, S. 303 – 305

Brouwer, L.E.J. (1905), *Life, Art and Mysticism*, auszugweise repr. in: Collected Works I, hrsg. von Arend Heyting, Amsterdam und Oxford 1975, S. 1 – 10

Brouwer, L.E.J. (1907), *On the Foundations of Mathematics*, in: Collected Works I, hrsg. von Arend Heyting, Amsterdam und Oxford 1975, S. 11 – 101

Brouwer, L.E.J (1912), *Intuitionism and Formalism*, in: Collected Works I, hrsg. von Arend Heyting, Amsterdam und Oxford 1975, S. 123 – 138

Brouwer, L.E.J. (1928a), *Mathematics. Intuitionistische Betrachtungen über den Formalismus*, in: Collected Works I, hrsg. von Arend Heyting, Amsterdam und Oxford 1975, S. 409 – 414

Brouwer, L.E.J. (1928b), *Mathematik, Wissenschaft und Sprache*, in: Collected Works I, hrsg. von Arend Heyting, Amsterdam und Oxford 1975, S. 417 – 428

Burchardt, Lothar (1977), *Technischer Fortschritt und sozialer Wandel.* Das Beispiel der Taylorismus-Rezeption, in: Wilhelm Treue (Hrsg.), Deutsche Technikgeschichte, Göttingen, S. 52 – 98

Burks, Arthur W. u.a. (1946), *Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument*, auszugsweise repr. in: Brian Randell (Hrsg.), The Origins of Digital Computers, Berlin – Heidelberg - New York 1982, S. 399 – 413

Burks, Arthur W., Alice R. Burks (1981), *The ENIAC: First General-Purpose Electronic Computer*, in: Annals of the History of Computing, 3, 4, S. 310 – 389

Butler, Judith (1991), *Das Unbehagen der Geschlechter*, Frankfurt/M.

Callon, Michel (1987), *Society in the Making: The Study of Technology as a Tool for Sociological Analysis*, in: Wiebe E. Bijker u.a. (Hrsg.), The Social Construction of Technological Systems. New Directions in the Sociology and History of Technology, Cambridge, Mass., S. 83 – 103

Carpenter, B.E., R.W. Doran (Hrsg.) (1986), *A. M. Turings ACE Report of 1946 and other Papers*, Cambridge, Mass.

Ceruzzi, Paul E. (1983), *Reckoners. The Prehistory of the Digital Computer. From Relays to the Stored Program Concept, 1935 – 1945*, Westport, Conn.

Ceruzzi, Paul E. (1986), *An Unforeseen Revolution: Computers and Expectations, 1935 – 1985*, in: Joseph J. Corn (Hrsg.), Imagining Tomorrow, Cambridge, Mass., S. 188 – 201

Ceruzzi, Paul E. (1989), *Electronics Technology and Computer Science, 1940 – 1975: A Coevolution*, in: Annals of the History of Computing, 10, 4, S. 257 – 275

Ceruzzi, Paul E. (1990a), *Relay Computers*, in: William Aspray (Hrsg.), Computing Before Computers, Ames, S. 200 – 222

Ceruzzi, Paul E. (1990b), *Electronic Calculators*, in: William Aspray (Hrsg.), Computing Before Computers, Ames, S. 223 – 249

Church, Alonzo (1936), *An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory*, in: Martin Davis (Hrsg.), The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions, New York 1965, S. 89 – 107

Cohen, Jonathan (1955), *Can There Be Artificial Minds?* in: Analysis, 16, S. 36 – 41

Cohen, R.S. u.a. (Hrsg.) (1976), *Essays in the Memory of Imre Lakatos*, Dordrecht

Colby, Kenneth M. u.a. (1972), *Turing-Like Indistinguishability Tests for the Validation of a Computer Simulation of Paranoid Processes*, in: Artificial Intelligence, 3, S. 199 – 221

Colby, Kenneth M. (1981), *Modeling a Paranoid Mind*, in: The Behavioral and Brain Sciences, 4, S. 515 – 560

Collins, H.M. (Hrsg.) (1981), *Knowledge and Controversy: Studies of Modern Natural Science*, Social Studies of Science, 11, 1

Collins, H.M. (1983), *An Empirical Relativist Programme in the Sociology of Scientific Knowledge*, in: Karin Knorr-Cetina und Michael Mulkay (Hrsg), Science Observed. Perspectives on the Study of Science, London, S. 85 – 114

Collins, H.M. (1985a), *Replicating the TEA-Laser: Maintaining Scientific Knowledge*, in: ders., Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice, London, S. 51 – 78

Collins, H.M. (1985b), *Detecting Gravitational Radiation: The Experimenters' Regress*, in: ders., Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice, London, S. 79 – 112

Collins, H.M. (1985c), *Die Soziologie wissenschaftlichen Wissens: Studien zur gegenwärtigen Wissenschaft*, in: Wolfgang Bonß und Heinz Hartmann (Hrsg.), Entzauberte Wissenschaft. Zur Relativität und Geltung soziologischer Forschung, Soziale Welt, Sonderband 3, Göttingen, S. 129 – 149

Collins, H.M. (1987), *Expert Systems, Artificial Intelligence and the Behavioural Co-ordinates of Skill*, in: Brian P. Bloomfield (Hrsg.), The Question of Artificial Intelligence: Philosophical and Sociological Perspectives, London, S. 258 – 282

Collins, H.M. (1990), *Artificial Experts*. Social Knowledge and Intelligent Machines, Cambridge, Mass. 1990

Collins, H.M., Trevor J. Pinch (1979) *The Construction of the Paranormal: Nothing Unscientific is Happening*, in: Roy Wallis (Hrsg.), On the Margins of Science. The Social Construction of Rejected Knowledge, Keele, S. 237 – 270

Dahme, Heinz-Jürgen (1988), *Der Verlust des Fortschrittsglaubes und die Verwissenschaftlichung der Soziologie*. Ein Vergleich von Georg Simmel, Ferdinand Tönnies und Max Weber, in: Otthein Rammstedt (Hrsg.), Simmel und die frühen Soziologen, Frankfurt/M., S. 222 – 274

Dahme, Heinz-Jürgen, Otthein Rammstedt (1984), *Die zeitlose Modernität der soziologischen Klassiker*. Überlegungen zur Theoriekonstruktion von Emile Durkheim, Ferdinand Tönnies, Max Weber und besonders Georg Simmel, in: dies. (Hrsg.), Georg Simmel und die Moderne, Frankfurt/M., S. 449 – 478

Dalen, Dirk van (1978), *Brouwer: The Genesis of his Intuitionism*, in: Dialectica, 32, 3/4, S. 291 – 303

Dalen, Dirk van (1990), *The War of the Frogs and the Mice, or the Crisis of the Mathematische Annalen*, in: The Mathematical Intelligencer, 12, 4, S. 17 – 31

Davis, Philip J., Reuben Hersh (1985), *Erfahrung Mathematik*, Basel

Dawson, John W. (1988), *The Reception of Gödel's Incompleteness Theorem*, in: Stuart Shanker (Hrsg.), Gödel's Theorem in Focus, London, S. 74 – 95

Dedekind, Richard (1888), *Was sind und was sollen die Zahlen?* Braunschweig 1918

Dennett, Daniel C. (1971), *Intentional Systems*, in: ders. Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology, Cambridge, Mass. 1981, S. 3 – 22; deutsch in: Peter Bieri (Hrsg.), Analytische Philosophie des Geistes, Königstein/Ts. 1981, S. 162 – 181

Dennett, Daniel C. (1975), *Why the Law of Effect Will Not Go Away*, in: ders., Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology, Cambridge, Mass. 1981, S. 71 – 89

Detlefsen, Michael (1986), *Hilbert's Program*. An Essay on Mathematical Instrumentalism, Dordrecht

Devinat, Paul (1927), *Wissenschaftliche Betriebsführung in Europa*, hrsg. vom Internationalen Arbeitsamt, Genf

Döbert, Rainer (1989), *Max Webers Handlungstheorie und die Ebenen des Rationalitätskomplexes*, in: Johannes Weiß (Hrsg.), Max Weber heute, Frankfurt/M., S. 210 – 249

Dosi, Giovanni (1982), *Technological Paradigms and Technological Trajectories*, in: Research Policy, 11, S. 147 – 162

Dreyfus, Hubert L. u.a. (1984), *Has Artificial Intelligence Research Illuminated Human Thinking?* Panel Discussion, in: Heinz R. Pagels (Hrsg.), Computer Culture. The Scientific, Intellectual, and Social Impact of the Computer, New York, S. 138 – 160

Dreyfus, Hubert L. (1985), *Die Grenzen künstlicher Intelligenz*, Königstein/Ts.

Dreyfus, Hubert L., Stuart E. Dreyfus (1987), *Künstliche Intelligenz*. Von den Grenzen der Denkmaschine und dem Wert der Intuition, Reinbek b. Hamburg

Dreyfus, Hubert L., Stuart E. Dreyfus (1989), *Schöpfung des Geistes oder Modellierung des Gehirns?* in: Klagenfurter Beiträge zur Technikdiskussion, Heft 23

Duden, Barbara (1987), *Geschichte unter der Haut*, Stuttgart

Durkheim, Emile (1895), *Die Regeln der soziologischen Methode*, Frankfurt/M. 1984

Elkana, Yehuda (1986), *Anthropologie der Erkenntnis*. Die Entwicklung des Wissens als episches Theater einer listigen Vernunft, Frankfurt/M.

Elliot, Henry C. (1974), *Similarities between Science and Common Sense*, in: Roy Turner (Hrsg.), Ethnomethodology, Harmondsworth, S. 21 – 26

Engeler, Erwin (1978), *Zum logischen Werk von Paul Bernays*, in: Dialectica, 32, 3/4, S. 191 – 200

Enzensberger, Hans Magnus (1975), *Mausoleum*. Siebenunddreißig Balladen aus der Geschichte des Fortschritts, Frankfurt/M.

Ernst Andreas, Erich Wigger (1992), *Krise und Restabilisierung in der Schweiz (1915 – 1925)*, unveröffentlichte Lizentiatsarbeit, Zürich

Finsler, Paul (1926), *Formale Beweise und die Entscheidbarkeit*, in: Mathematische Zeitschrift, 25, S. 676 – 682

Finsler, Paul (1944), *Gibt es unentscheidbare Sätze?* in: Commentarii Mathematici Helvetici, 16, S. 310 – 320

Fleck, James (1982), *Development and Establishment in Artificial Intelligence*, in: Norbert Elias u.a. (Hrsg.), Scientific Establishment and Hierarchies, Dordrecht, S. 169 – 217

Fleck, Ludwik (1935), *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache*, Frankfurt/M. 1980

Fleck, Ludwik (1935b), *Über die wissenschaftliche Beobachtung und die Wahrnehmung im allgemeinen*, in: ders., Erfahrung und Tatsache, Frankfurt/M. 1983, S. 59 – 83

Fleck, Ludwik (1947), *Schauen, sehen, wissen*, in: ders., Erfahrung und Tatsache, Frankfurt/M. 1983, S. 147 – 174

Fleck, Ludwik (1960), *Krise in der Wissenschaft*. Zu einer freien und menschlichen Wissenschaft, in: ders., Erfahrung und Tatsache, Frankfurt/M. 1983, S. 175 – 181

Flynn, Michael J. (1972), *Some Computer Organizations and Their Effectiveness*, in: IEEE Transactions on Computers, C–21,9, S. 948 – 960

Fodor, Jerry A. (1987), *Psychosemantics*, Cambridge, Mass.

Fodor, Jerry A., Zenon W. Pylyshyn (1989), *Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis*, in: Steven Pinker und Jacques Mehler (Hrsg.), Connections and Symbols, Cambridge, Mass., S. 3 – 72

Ford, Henry (1923), *Mein Leben und Werk*, Leipzig

Forman, Paul (1971), *Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918 – 1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment*, in: Historical Studies in the Physical Sciences, 3, S. 1 – 115

Forum für Philosophie Bad Homburg (Hrsg.) (1992), *Realismus und Antirealismus*, Frankfurt/M.

Fraenkel, Abraham (Adolf) (1924), *Über die gegenwärtige Grundlagenkrise der Mathematik*, in: Sitzungsberichte der Gesellschaft zur Beförderung der gesamten Naturwissenschaften, 5, Juni, S. 83 – 98

Fraenkel, Abraham (Adolf) (1927), *Zehn Vorlesungen über die Grundlegung der Mengenlehre*, Leipzig und Berlin 1927

Franzen, Winfried (1992), *Totgesagte leben länger. Beyond Realism and Anti-Realism: Realism*, in: Forum für Philosophie Bad Homburg (Hrsg.), Realismus und Antirealismus, Frankfurt/M., S. 20 – 65

Frege, Gottlob (1976), *Wissenschaftlicher Briefwechsel*, hrsg. von Gottfried Gabriel u.a., Hamburg

Freudenthal, Gad (1980), *Wissenssoziologie der Naturwissenschaften: Bedingungen und Grenzen ihrer Möglichkeit*, in: Nico Stehr und Volker Meja (Hrsg.), Wissenssoziologie, Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 22, Opladen, S. 153 – 162

Freudenthal, Gad (1984), *The Rule of Shared Knowledge in Science: The Failure of the Constructivist Programme in the Sociology of Science*, in: Social Studies of Science, 14, S. 285 – 295

Freudenthal, Hans (1957), *Zur Geschichte der Grundlagen der Geometrie*, in: Nieuw Archief voor Wiskunde, 4, 5, S. 105 – 142

Fridenson, Patrick (1978), *The Coming of the Assembly Line to Europe*, in: Wolfgang Krohn u.a. (Hrsg.), The Dynamics of Science and Technology, Dordrecht, S. 159 – 175

Galliker, Adolf (1956), *Automation – Animation*, Zürich

Gandy, Robin (1988), *The Confluence of Ideas in 1936*, in: Rolf Herken (Hrsg.), The Universal Turing Machine. A Half Century Survey, Berlin, S. 55 – 112

Gardner, Howard (1985), *The Mind's New Science. A History of the Cognitive Revolution*, New York; dt.: Dem Denken auf der Spur. Der Weg der Kognitionswissenschaft, Stuttgart 1989

Garciadiego, Alejandro R. (1986), *On Rewriting the History of the Foundations of Mathematics at the Turn of the Century*, in: Historia Mathematica, 13, S. 39 – 41

Garfinkel, Harold (1967), *Studies in Ethnomethodology*, Cambridge 1990

Garfinkel, Harold (1973), *Das Alltagswissen über soziale und innerhalb sozialer Strukturen*, in: Arbeitsgruppe Bielefelder Soziologen (Hrsg.), Alltagswissen, Interaktion und gesellschaftliche Wirklichkeit, Bd. 1, Reinbek b. Hamburg, S. 189 – 262

Gendolla, Peter (1980), *Die lebenden Maschinen*. Zur Geschichte des Maschinenmenschen bei Jean Paul, E.T.A. Hoffmann und Villiers de l'Isle Adam, Marburg

Gentzen, Gerhard (1938), *Die gegenwärtige Lage in der mathematischen Grundlagenforschung*, in: Deutsche Mathematik, 3, 3, S. 255 – 268

Geser, Hans (1989), *Der PC als Interaktionspartner*, in: Zeitschrift für Soziologie, 18, 3, S. 230 – 242

Giddens, Anthony (1988), *Die Konstitution der Gesellschaft*, Frankfurt/M.

Gieryn, Thomas F. (1982), *Relativist/Constructivist Programmes in the Sociology of Science: Redundance and Retreat*, in: Social Studies of Science, 12, S. 279 – 297

Gilbert, Nigel G., Michael Mulkay (1985), *Die Rechtfertigung wissenschaftlicher Überzeugungen*, in: Wolfgang Bonß und Heinz Hartmann (Hrsg.), Entzauberte Wissenschaft. Zur Relativität und Geltung soziologischer Forschung, Soziale Welt, Sonderband 3, Göttingen, S. 207 – 227

Giloi, Wolfgang K. (1981), *Rechnerarchitektur*, Berlin – Heidelberg – New York

Gödel, Kurt (1931a), *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I*, in: Collected Works, Vol. 1, hrsg. von Solomon Feferman u.a., New York – Oxford 1986, S. 144 – 195

Gödel, Kurt (1931b), *Diskussion zur Grundlegung der Mathematik*, in: Collected Works, Vol. 1, hrsg. von Solomon Feferman u.a., New York – Oxford 1986, S. 200 – 204

Gödel, Kurt (1964), *On Undecidable Propositions of Formal Mathematical Systems: Postscriptum*, in: Martin Davis (Hrsg.), The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions, New York 1965, S. 71 – 74

Goffman, Erving (1977), *Rahmen-Analyse*. Ein Versuch über die Organisation von Alltagserfahrungen, Frankfurt/M.

Goldfarb, Warren (1988), *Poincaré Against the Logicists*, in: William Aspray und Philip Kitcher (Hrsg.), History and Philosophy of Modern Mathematics, Minneapolis, S. 61 – 81

Görz, Günther (1987), *Möglichkeiten der Automatisierung kognitiver Leistungen*. Zur Problematik der 'Künstlichen Intelligenz', in: Technik und Gesellschaft. Jahrbuch 4, hrsg. von Gotthard Bechmann und Werner Rammert, Frankfurt/M., S. 178 – 199

Gottl-Ottlilienfeld, Friedrich von (1925), *Fordismus?* Von Frederick W. Taylor zu Henry Ford, Jena

Grattan-Guiness, Ivor (1979), *In Memoriam Kurt Gödel: His 1931 Correspondence with Zermelo on his Incompletability Theorem*, in: Historia Mathematica, 6, S. 295 – 304

Graubard, Stephen R. (Hrsg.) (1988), *The Artificial Intelligence Debate*, Cambridge, Mass.

Gregersen, Frans, Simo Koppe (1988), *Against Epistemological Relativism*, in: Studies in History and Philosophy of Science, 19, 4, S. 447 – 487

Gutknecht, Martin H. (1987), *The Pioneer Days of Scientific Computing in Switzerland*, in: ACM Conference on the History of Scientific and Numeric Computation, Princeton, S. 63 – 69

Habermas, Jürgen (1973), *Wahrheitstheorien*, in: ders., Vorstudien und Ergänzungen zur Theorie des kommunikativen Handelns, Frankfurt/M. 1984, S. 126 – 182

Habermas, Jürgen (1981), *Die Theorie kommunikativen Handelns*, 2 Bde., Frankfurt/M.

Hahn, Hans (1919), *Besprechung von Alfred Pringsheim: Vorlesungen über Zahlen- und Funktionslehre*, in: ders., Empirismus, Logik, Mathematik, Frankfurt/M. 1988, S. 66 – 95

Hahn, Hans (1934), *Gibt es Unendliches?* in: ders., Empirismus, Logik, Mathematik, Frankfurt/M. 1988, S. 115 – 140

Halsbury, Rt. Hon. The Earl of (1959), *Ten Years of Computer Development*, in: The Computer Journal, 1, 4, S. 153 – 159

Hardy, G.H. (1929), *Mathematical Proof*, in: ders., Collected Works, Vol. VII, Oxford 1979, S. 1 – 25

Hardy, G.H. (1940), *A Mathematician's Apology*, Cambridge

Hastedt, Heiner (1988), *Das Leib-Seele-Problem*, Frankfurt/M.
Haugeland, John (1981), *Semantic Engines: An Introduction to Mind Design*, in: ders. (Hrsg.), Mind Design, Cambridge, Mass., S. 1 – 34
Haugeland, John (1987), *Künstliche Intelligenz, programmierte Vernunft*, Hamburg
Heintz, Bettina (1987), *Die Chip-Generation – eine neue soziale Bewegung?* in: Martin Dahinden (Hrsg.), Neue soziale Bewegungen – und ihre gesellschaftlichen Wirkungen, Zürich, S. 147 – 164
Heintz, Bettina (1990a), *Das Fließband im Kopf.* Computer und Rationalisierung, in: Sebastian Brändli u.a. (Hrsg.), Schweiz im Wandel. Studien zur neueren Gesellschaftsgeschichte, Basel 1990, S. 117 – 147
Heintz, Bettina (1990b), *Technik und Theorie.* Das Maschinenmodell der Cognitive Science, unveröffentl. Manuskript, Zürich
Heintz, Bettina (1991a), *Modernisierungsstrategien und Computerarchitekturen*, in: Bernward Joerges (Hrsg.), Wissenschaft – Technik – Modernisierung, WZB-Papers, Berlin 1991, S. 44 – 72
Heintz, Bettina (1991b), *Regel-Werke.* Von der Maschinenwerdung des Menschen und der Menschwerdung der Maschine, in: Silvia Henke und Sabina Mohler (Hrsg.), Wie es ihr gefällt. Künste, Wissenschaft & alles andere, Freiburg i.B., VII, S. 5 – 21
Heintz, Bettina, Claudia Honegger (1981), *Zum Strukturwandel weiblicher Widerstandsformen im 19. Jahrhundert,* in: dies. (Hrsg.), Listen der Ohnmacht. Zur Sozialgeschichte weiblicher Widerstandsformen, Frankfurt/M., S. 7 – 68
Heitsch, Wolfgang (1976), *Mathematik und Weltanschauung*, Berlin-Ost
Herbold, Ralf u.a. (1991), *Technikentwicklung als soziales Experiment,* in: Bernward Joerges (Hrsg.), Wissenschaft – Technik – Modernisierung, WZB-Papers, Berlin 1991, S. 76 – 95
Herken, Rolf (Hrsg.) (1988), *The Universal Turing Machine.* A Half Century Survey, Berlin
Hermes, Hans (1978), *Aufzählbarkeit. Entscheidbarkeit. Berechenbarkeit,* Berlin – Heidelberg – New York
Hersh, Reuben (1978), *Introducing Imre Lakatos*, in: Mathematical Intelligencer, 1, S. 148 – 151
Hesse, Mary (1980a), *The Strong Thesis of the Sociology of Science*, in: dies., Revolutions and Reconstructions in the Philosophy of Science, Brighton, S. 29 – 60
Hesse, Mary (1980b), *Theory and Observation*, in: dies., Revolutions and Reconstructions in the Philosophy of Science, Brighton, S. 63 – 110
Heyting, Arend (1934), *Mathematische Grundlagenforschung, Intuitionismus, Beweistheorie*, Berlin
Hilbert, David (1899), *Grundlagen der Geometrie*, Leipzig 1909[3]

Hilbert, David (1900a), *Mathematische Probleme,* in: Gesammelte Abhandlungen, Bd. 3, Berlin 1935, S. 290 – 329
Hilbert, David (1900b), *Über den Zahlbegriff,* in ders., Grundlagen der Geometrie, Anhang VI, Leipzig 1909, S. 256 – 262
Hilbert, David (1905), *Über die Grundlagen der Logik und der Arithmetik,* in: ders., Grundlagen der Geometrie, Anhang VII, Leipzig 1909, S. 263 – 279
Hilbert, David (1918), *Axiomatisches Denken,* in: ders., Hilbertiana, Darmstadt 1964, S. 1 – 11
Hilbert, David (1922), *Neubegründung der Mathematik.* Erste Mitteilung, in: ders., Hilbertiana, Darmstadt 1964, S. 12 – 32
Hilbert, David (1923), *Die logischen Grundlagen der Mathematik,* in: ders., Hilbertiana, Darmstadt 1964, S. 33 – 48
Hilbert, David (1925), *Über das Unendliche,* in: ders., Hilbertiana, Darmstadt 1964, S. 79 – 108
Hilbert, David (1928), *Die Grundlagen der Mathematik,* in: Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar Hamburg, 6, S. 65 – 85
Hilbert, David (1930a), *Naturerkennen und Logik,* in: ders., Gesammelte Abhandlungen, Bd. 3, Berlin 1935, S. 378 – 387
Hilbert, David (1930b), *Probleme der Grundlegung der Mathematik,* in: K. Reidemeister (Hrsg.), Hilbert, Berlin – Heidelberg – New York 1971, S. 9 – 19
Hilbert, David, Paul Bernays (1934), *Grundlagen der Mathematik,* Bd. 1, Göttingen
Hilbert, David, Paul Bernays (1939), *Grundlagen der Mathematik,* Bd. 2, Göttingen
Hilton, Peter (1991), *Working with Alan Turing,* in: The Mathematical Intelligencer, 13, S. 22 – 23
Hirschauer, Stefan (1989), *Die interaktive Konstruktion von Geschlechtszugehörigkeit,* in: Zeitschrift für Soziologie, 18, 2, S. 100 – 118
Hobbes, Thomas (1984), *Leviathan,* Frankfurt/M.
Hochhuth, Rolf (1987), *Alan Turing.* Erzählung, Reinbek b. Hamburg
Hodges, Andrew (1988), *Alan Turing and the Turing Machine,* in: Rolf Herken (Hrsg.), The Universal Turing Machine. A Half Century Survey, Berlin, S. 3 – 16
Hodges, Andrew (1989), *Alan Turing, Enigma,* Berlin
Hoffmann, E.T.A. (1816), *Der Sandmann,* in: Gesammelte Werke, Bd. 5, Zürich 1946
Hoffmann, Ute (1987), *Computerfrauen.* Welchen Anteil haben Frauen an Computergeschichte und -arbeit? München
Hofstadter, Douglas R. (1985), *Gödel – Escher – Bach,* Stuttgart
Holton, Gerald (1981), *Thematische Analyse der Wissenschaft.* Die Physik Einsteins und seiner Zeit, Frankfurt/M.

Homburg, Heidrun (1978), *Anfänge des Taylorsystems in Deutschland vor dem Ersten Weltkrieg*, in: Geschichte und Gesellschaft, 4, 1, S. 170 – 194

Hook, Sidney (Hrsg.) (1960), *Dimensions of Mind*, New York

Hörning, Karl H. (1985), *Technik und Symbol*. Ein Beitrag zur Soziologie alltäglichen Technikumgangs, in: Soziale Welt, 36, 2, S. 186 – 207

Hörning, Karl H. (1988), *Technik im Alltag und die Widersprüchlichkeiten des Alltäglichen*, in: Bernward Joerges (Hrsg.), Technik im Alltag, Frankfurt/M., S. 55 – 102

Hörning, Karl H. (1989), *Vom Umgang mit den Dingen – Eine techniksoziologische Zuspitzung*, in: Peter Weingart (Hrsg.), Technik als sozialer Prozeß, Frankfurt/M., S. 90 – 127

Horkheimer, Max, Theodor W. Adorno (1944), *Dialektik der Aufklärung*, Frankfurt/M. 1971

Hoyningen-Huene, Paul (1989), *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns*, Braunschweig

Hughes, Thomas P. (1975), *ENIAC: Invention of a Computer*, in: Technikgeschichte, 42, 2, S. 148 – 165

Hughes, Thomas P. (1987), *The Evolution of Large Technological Systems*, in: Wiebe E. Bijker u.a. (Hrsg.), The Social Construction of Technological Systems. New Directions in the Sociology and History of Technology, Cambridge, Mass., S. 51 – 82

Husserl, Edmund (1936), *Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendentale Phänomenologie*, hrsg. von Elisabeth Ströker, Hamburg 1982

Huxley, Aldous (1932), *Schöne Neue Welt*, Hamburg 1960

Jahnke, Hans Niels (1990), *J.F. Herbart: Nach-Kantische Philosophie und die Theoretisierung der Mathematik*, in: Gert König (Hrsg.), Konzepte des mathematisch Unendlichen im 19. Jahrhundert, Göttingen, S. 165 – 188

Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, 1921, 30

Jaun, Rudolf (1986), *Management und Arbeiterschaft*. Verwissenschaftlichung, Amerikanisierung und Rationalisierung der Arbeitsverhältnisse in der Schweiz 1873 – 1959, Zürich

Joerges, Bernward (1988a) (Hrsg.), *Technik im Alltag*, Frankfurt/M.

Joerges, Bernward (1988b), *Gerätetechnik und Alltagshandeln*. Vorschläge zur Analyse der Technisierung alltäglicher Handlungsstrukturen, in: ders. (Hrsg.), Technik im Alltag, Frankfurt/M., S. 20 – 50

Joerges, Bernward (1988c), *Large Technical Systems: Concepts and Issues*, in: Renate Mayntz und Thomas Hughes (Hrsg.), The Development of Large Technological Systems, Frankfurt/Main, S. 9 - 36

Joerges, Bernward (1989a), *Soziologie und Maschinerie – Vorschläge zu einer 'realistischen' Techniksoziologie*, in: Peter Weingart (Hrsg.), Technik als sozialer Prozeß , Frankfurt/M., S. 44 – 89

Joerges, Bernward (1989b), *Technische Normen – soziale Normen?* in: Soziale Welt, 40, 1/2, S. 242 – 258

Joerges, Bernward (1989c), *Romancing the Machine*. Reflections on the Social Scientific Construction of Computer Reality, in: International Studies of Management & Organizations, 19, 4, S. 24 – 50

Jokisch, Rodrigo (1982) (Hrsg.), *Techniksoziologie*, Frankfurt/M.

Kalberg, Stephen (1981), *Max Webers Typen der Rationalität*. Grundsteine für die Analyse von Rationalisierungs-Prozessen in der Geschichte, in: Walter M. Sprondel und Constans Seyfarth (Hrsg.), Max Weber und die Rationalisierung sozialen Handelns, Stuttgart, S. 9 – 38

Käsler, Dirk (1984), *Die frühe deutsche Soziologie 1909 – 1934 und ihre Entstehungsmilieus*, Opladen

Käsler, Dirk (1991), *Erfolg eines Mißverständnisses?* Zur Wirkungsgeschichte von 'Gemeinschaft und Gesellschaft' in der frühen deutschen Soziologie, in: Lars Clausen und Carsten Schlüter (Hrsg.), 100 Jahre *Gemeinschaft und Gesellschaft*, Opladen, S. 517 – 526

Kemke, C. (1988), *Der Neuere Konnektionismus*. Ein Überblick, in: Informatik-Spektrum, 11, S. 143 – 162

Kessler, Suzanne, Wendy McKenna (1978), *Gender*. An Ethnomethodological Approach, New York

Kettler, David u.a. (1989), *Politisches Wissen*. Studien zu Karl Mannheim, Frankfurt/M.

Kidder, Tracy (1984), *Die Seele einer Maschine*. Vom Entstehen eines Computers, Reinbek b. Hamburg

Kitcher, Philip (1976), *Hilbert's Epistemology*, in: Philosophy of Science, 43, S. 99 – 115

Kleene, Stephen C. (1987), *Reflections on Church's Thesis*, in: Notre Dame Journal of Formal Logic, 28, 4, S. 490 – 498

Kleene, Stephen C. (1988), *Turing's Analysis of Computability, and Major Applications of It*, in: Rolf Herken (Hrsg.), The Universal Turing Machine. A Half Century Survey, Berlin, S. 17 – 54

Kline, Morris (1980), *Mathematics: The Loss of Certainty*, New York

Knorr-Cetina, Karin (1982), *The Constructivist Programme in the Sociology of Science: Retreats or Advances?* in: Social Studies of Science, 12, S. 320 – 324

Knorr-Cetina, Karin (1983), *The Ethnographic Study of Scientific Work: Towards a Constructivist Interpretation of Science*, in: Karin Knorr-Cetina und Michael Mulkay (Hrsg.), Science Observed. Perspectives on the Social Study of Science, London, S. 115 – 140

Knorr-Cetina, Karin (1984), *Die Fabrikation von Erkenntnis*, Frankfurt/M.

Knorr-Cetina, Karin (1988), *Das naturwissenschaftliche Labor als Ort der 'Verdichtung' von Gesellschaft*, in: Zeitschrift für Soziologie, 1988, 17, 2, S. 85 – 101

Knorr-Cetina, Karin (1989), *Spielarten des Konstruktivismus.* Einige Notizen und Anmerkungen, in: Soziale Welt, 40, 1/2, S. 86 – 96

Knorr-Cetina, Karin (1991), *Die Rolle des Körpers im Erkenntnisprozeß*, in: Silvia Henke und Sabina Mohler (Hrsg.), Wie es ihr gefällt. Künste, Wissenschaft & alles andere, Freiburg i.B., III, S. 5 – 17

Knorr-Cetina, Karin, Michael Mulkay (1983), *Emerging Principles in Social Studies of Science*, in: dies. (Hrsg.), Science Observed. Perspectives on the Social Study of Science, London

Knuth, Donald E. (1973), *The Art of Computer Programming*, Vol. 1: Fundamental Algorithms, Reading, Mass.

Kocka, Jürgen (1968), *Unternehmensverwaltung und Angestelltenschaft am Beispiel Siemens, 1847 – 1914*, Stuttgart

Kocka, Jürgen (1969), *Industrielles Management: Konzeptionen und Modelle in Deutschland vor 1914*, in: Vierteljahresschrift für Sozial- und Wirtschaftsgeschichte, 3, S. 332 - 372

König, Mario, Hannes Siegrist und Ruedi Vetterli, (1985), *Warten und Aufrücken.* Die Angestellten in der Schweiz 1870 – 1950, Zürich

Koetsier, Teun (1991), *Lakatos' Philosophy of Mathematics.* A Historical Approach, Amsterdam – London

Krämer, Sybille (1988), *Symbolische Maschinen.* Die Idee der Formalisierung im geschichtlichen Abriß, Darmstadt

Krämer, Sybille (1990), *Das Scheitern der universalen Denkmaschine*, in: Ethik und Sozialwissenschaften, 1, 1, S. 128 – 130

Krämer, Sybille (1991), *Die Säkularisierung der Symbole: Ein Projekt der Neuzeit und seine (post)modernen Folgen*, in: Bernward Joerges (Hrsg.), Wissenschaft – Technik –Modernisierung, WZB-Papers, Berlin, S. 19 – 30

Krips, H. (1982), *Epistemological Holism: Duhem or Quine?* in: Studies in History and Philosophy of Science, 13, 3, S. 251 – 264

Krohn, Wolfgang, Johannes Weyer (1989), *Gesellschaft als Labor*, in: Soziale Welt, 40, 3, S. 349 – 373

Kuhn, Thomas S. (1962), *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt/M. 1976

Kuhn, Thomas S. (1977), *Neue Überlegungen zum Begriff des Paradigma*, in: ders., Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte, Frankfurt/M., S. 389 – 420

Kutschmann, Werner (1986), *Der Naturwissenschaftler und sein Körper.* Die Rolle der 'inneren Natur' in der experimentellen Naturwissenschaft der frühen Neuzeit, Frankfurt/M.

Lakatos, Imre (1963), *Beweise und Widerlegungen*, Wiesbaden 1979

Lakatos, Imre (1967), *A Renaissance of Empiricism in the Recent Philosophy of Mathematics?* in: ders., Mathematics, Science and Epistemology, Cambridge, 1978, S. 24 – 42; dt.: Mathematik, empirische Wissenschaft und Erkenntnistheorie, Braunschweig 1982

Lakatos, Imre (1970), *Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes*, in: ders., The Methodology of Scientific Research Programmes, Cambridge 1978, S. 8 – 101; dt.: Die Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme, Braunschweig 1982

Lakatos, Imre (1971), *Die Geschichte der Wissenschaft und ihre rationalen Rekonstruktionen*, in: Werner Diederich (Hrsg.), Theorien der Wissenschaftsgeschichte, Frankfurt/M 1974, S. 55 – 119

Lakatos, Imre (1974), *Introduction: Science and Pseudoscience*, in: ders., The Methodology of Scientific Research Programmes, Cambridge 1978, S. 1 – 7

Laudan, Larry (1981), *The Pseudo-Science of Science?* in: Philosophy of the Social Sciences, 11, S. 173 – 198

Linde, Hans (1982), *Soziale Implikationen technischer Geräte, ihrer Entstehung und Verwendung*, in: Rodrigo Jokisch (Hrsg.), Techniksoziologie, Frankfurt/M., S. 1 – 31

Lindner, Helmut (1980), *'Deutsche' und 'gegentypische' Mathematik. Zur Begründung einer 'arteigenen' Mathematik im 'Dritten Reich' durch Ludwig Bieberbach*, in: Herbert Mehrtens und Steffen Richter (Hrsg.), Naturwissenschaft, Technik und NS-Ideologie. Beiträge zur Wissenschaftsgeschichte des Dritten Reiches, Frankfurt/M., S. 88 – 115

Locher, L. (1937/38), *Die Finsler'schen Arbeiten zur Grundlegung der Mathematik*, in: Commentarii Mathematici Helvetici, 10, S. 206 – 207

Lorenzen, Paul (1968a), *Das Aktual-Unendliche in der Mathematik*, in: ders., Methodisches Denken, Frankfurt/M., S. 94 – 103

Lorenzen, Paul (1968b), *Moralische Argumentationen im Grundlagenstreit der Mathematik*, in: ders., Methodisches Denken, Frankfurt/M., S. 152 – 162

Lorenzen, Paul (1980), *Metamathematik*, Mannheim – Wien – Zürich

Lucas, John (1961), *Minds, Machines and Gödel*, in: Alan Ross Anderson (Hrsg.), Minds and Machines, New York 1964, S. 43 – 59

Luhmann, Niklas (1981), *Wie ist soziale Ordnung möglich?* in: ders., Gesellschaftsstruktur und Semantik. Studien zur Wissenssoziologie der modernen Gesellschaft, Frankfurt/M., Bd. II, S. 195 – 286

Luhmann, Niklas (1984), *Soziale Systeme*, Frankfurt/M.

Lüscher, Rudolf M. (1988), *Henry und die Krümelmonster*. Versuch über den fordistischen Charakter, Tübingen

MacKay, D.M. (1951), *Mindlike Behavior in Artefacts*, in: British Journal for the Philosophy of Science, 2, 6, S. 105 – 121

MacKenzie, Donald, Barry Barnes (1975), *Biometriker versus Mendelianer*. Eine Kontroverse und ihre Erklärung, in: Nico Stehr und René König (Hrsg.), Wissenschaftssoziologie, Opladen 1975, S. 165 – 196

MacKenzie, Donald, Judy Wajcman (Hrsg.) (1985), *The Social Shaping of Technology*, Philadelphia

Maier, Charles S. (1970), *Between Taylorism and Technocracy: European Ideologies and the Vision of Industrial Productivity in the 1920's*, in: Journal of Contemporary History, 5, 2, S. 27 – 61

Manin, Yu I. (1979), *How Convincing is a Proof?* in: The Mathematical Intelligencer, 2, S. 17 – 18

Mannheim, Karl (1921), *Beiträge zur Theorie der Weltanschauungs-Interpretation* (1921), in: ders., Wissenssoziologie, hrsg. von Kurt H. Wolff, Berlin und Neuwied 1964, S. 91 – 154

Mannheim, Karl (1922), *Über die Eigenart kultursoziologischer Erkenntnis*, in: ders., Strukturen des Denkens, hrsg. von David Kettler u.a., Frankfurt/M. 1980, S. 33 – 154

Mannheim, Karl (1925), *Das Problem einer Soziologie des Wissens*, in: ders., Wissenssoziologie, hrsg. von Kurt H. Wolff, Neuwied und Berlin 1964, S. 308 – 387

Mannheim, Karl (1969), *Ideologie und Utopie*, Frankfurt/M.

Mannheim, Karl (1931), *Wissenssoziologie*, in: ders., Ideologie und Utopie, Frankfurt/M. 1969, S. 227 – 267

Matthiesen, Ulf (1984), *Das Dickicht der Lebenswelt und die Theorie kommunikativen Handelns*, München

Mauchly, John W. (1947), *Preparation of Problems for EDVAC-Type Machines*, in: Brian Randell (Hrsg.), The Origins of Digital Computers, Berlin – Heidelberg – New York 1982, S. 393 – 397

McCorduck, Pamela (1979), *Machines Who Think*, New York

McCulloch, Warren S., Walter H. Pitts (1943), *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*, in: Margaret A. Boden (Hrsg.), The Philosophy of Artificial Intelligence, Oxford 1990, S. 22 – 39

Mehrtens, Herbert (1984), *Anschauungswelt versus Papierwelt – Zur historischen Interpretation der Grundlagenkrise der Mathematik*, in: Hans Poser und Hans-Werner Schütt (Hrsg.), Ontologie und Wissenschaft, Berlin, S. 231 – 276

Mehrtens, Herbert (1985), *Die 'Gleichschaltung' der mathematischen Gesellschaften im nationalsozialistischen Deutschland*, in: Jahrbuch Überblicke Mathematik, S. 83 – 103

Mehrtens, Herbert (1990), *Moderne – Sprache – Mathematik.* Eine Geschichte des Streits um die Grundlagen der Disziplin und des Subjekts formaler Systeme, Frankfurt/M.

Meja, Volker, Nico Stehr (Hrsg.) (1982), *Der Streit um die Wissenssoziologie*, 2 Bde., Frankfurt/M.

Miller, George A. u.a. (1960), *Plans and the Structure of Behavior*, New York, dt.: Strategien des Handelns, Stuttgart 1973

Menzel, Christopher (1984), *Cantor and the Burali-Forti Paradox*, in: The Monist, 67, 1, S. 92 – 107

Minsky Marvin (1975), *A Framework for Representing Knowledge*, in: John Haugeland (Hrsg.), Mind Design, Cambridge, Mass. 1981, S. 95 - 128, dt. in: Dieter Münch (Hrsg.), Kognitionswissenschaft, Frankfurt/M. 1992, S. 92 - 133

Möller, Horst (1990), *Weimar*. Die unvollendete Demokratie, München

Moor, J.H. (1987), *Turing Test*, in: Encyclopedia of Artificial Intelligence, New York, Vol. 2, S. 1126 – 1130

Moore, Gregory H. (1978), *The Origin's of Zermelo's Axiomatization of Set Theory*, in: Journal of Philosophical Logic, 7, S. 307 – 329

Moore, Gregory H. (1990), *Towards A History of Cantor's Continuum Problem*, in: David E. Rowe und John McCleary (Hrsg.), The History of Modern Mathematics, Bd. 1., San Diego, S. 79 – 12

Moore, Gregory H. (1991), *Sixty Years After Gödel*, in: The Mathematical Intelligencer, 13, 3, S. 6 – 11

Moore, Gregory H., Alejandro Garciadiego (1981), *Burali-Forti's Paradox: A Reappraisal of its Origins*, in: Historia Mathematica, 8, S. 319 - 350

Mulkay, Michael (1979a), *Science and the Sociology of Knowledge*, London

Mulkay, Michael (1979b), *Knowledge and Utility: Implications for the Sociology of Knowledge*, in: Social Studies of Science, 9, S. 63 – 80; dt. in: Nico Stehr und Volker Meja (Hrsg.), Wissenssoziologie, Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 22, Opladen 1980, S. 52 – 72

Mulkay, Michael (1991), *Sociology of Science: A Sociological Pilgrimage*, Milton Keynes

Mulkay, Michael, Nigel G. Gilbert (1981), *Putting Philosophy to Work: Karl Popper's Influence on Scientific Practice*, in: Philosophy of the Social Sciences, 11, S. 389 – 407

Münch, Dieter (Hrsg.) (1992), *Kognitionswissenschaft*, Frankfurt/M.

Nagel, Ernest, James R. Newman (1958), *Der Gödelsche Beweis*, Wien und München

Neumann, John von (1925), *Eine Axiomatisierung der Mengenlehre*, in: Collected Works, Vol. I, hrsg. von A.H. Taub, Oxford 1961, S. 35 – 56

Neumann, John von (1927), *Zur Hilbertschen Beweistheorie*, in: Collected Works, Vol. 1, hrsg. von A.H. Taub, Oxford 1961, S. 256ff.

Neumann, John von (1945), *First Draft of a Report on the EDVAC*, auszugsweise repr. in: Brian Randell (Hrsg.), The Origins of Digital Computers, Berlin – Heidelberg – New York 1982, S. 383 – 392

Neumann, John von (1951), *Allgemeine und logische Theorie der Automaten*, in: Kursbuch 1967, 8, S. 139 - 175

Newell, Allen (1986), *The Symbol Level and the Knowledge Level*, in: Zenon W. Pylyshyn und William Demopoulos (Hrsg.), Meaning and cognitive structure: Issues in the computational theory of mind, Norwood, S. 31 – 39

Newell, Allen, Herbert A. Simon (1976), *Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search*, in: John Haugeland (Hrsg.), Mind Design. Philosophy, Psychology, Artificial Intelligence, Cambridge, Mass., S. 35 - 66, dt. in: Dieter Münch (Hrsg.), Kognitionswissenschaft, Frankfurt/M. 1992, S. 54 – 91

Newman, M.H.A. (1955), *Alan Mathison Turing*, in: Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 1, S. 253 – 263

Nitschke, August u.a. (Hrsg.) (1990), *Jahrhundertwende. Der Aufbruch in die Moderne 1880 - 1930*, 2 Bde., Reinbek b. Hamburg

Noble, Donald T. (1978), *Social Choice in Machine Design: The Case of Automatically Controlled Machine Tools*, in: Politics and Society, S. 313 – 347

Nowotny, Helga (1979), *Kernenergie: Gefahr oder Notwendigkeit?* Frankfurt/M.

Nowotny, Helga (1982), *Leben im Labor und Draußen: Wissenschaft ohne Wissen?* in: Soziale Welt, 33, 2, S.208 – 220

Oldman, David, Charles Drucker (1985), *The Non-Reducability of Ethno-Methods: Can People and Computers Form a Society?* in: Nigel C. Gilbert und Christian Heath (Hrsg.), Social Action and Artificial Intelligence, Aldershot, S. 144 – 159

Overington, Michael A. (1985), *Einfach der Vernunft folgen: Neuere Entwicklungstendenzen in der Metatheorie*, in: Wolfgang Bonß und Heinz Hartmann (Hrsg.), Entzauberte Wissenschaft. Zur Relativität und Geltung soziologischer Forschung, Soziale Welt, Sonderband 3, Göttingen, S. 113 – 127

Owens, Larry (1986), *Vannevar Bush and the Differential Analyzer: The Text and Context of an Early Computer*, in: Technology & Culture, 27, 1, S. 63 – 95

Peckhaus, Volker (1990), *Hilbertprogramm und Kritische Philosophie*, Göttingen

Penrose, Roger (1989), *The Emperor's New Mind*. Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics, Oxford; dt.: Die Debatte um künstliche Intelligenz, Bewußtsein und die Gesetze der Physik, Frankfurt/M. 1991

Perrow, Charles, *Normale Katastrophen*, Frankfurt/M. 1987

Petzold, Hartmut (1985), *Rechnende Maschinen*. Eine historische Untersuchung ihrer Herstellung und Anwendung vom Kaiserreich bis zur Bundesrepublik, Düsseldorf

Peukert, Detlev J.K. (1987), *Die Weimarer Republik*. Krisenjahre der Klassischen Moderne, Frankfurt/M.

Phillips, Derek L. (1975), *Wittgenstein und die Soziologie der Mathematik*, in: Nico Stehr und René König (Hrsg.), Wissenschaftssoziologie, Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 18, Opladen, S. 64 – 78

Pinch, Trevor J. (1977), *What Does a Proof Do if it Does not Prove?* A Study of the Social Conditions and Metaphysical Divisions Leading to David Bohm and John von Neumann Failing to Communicate in Quantum Physics, in: Everett Mendelsohn u.a. (Hrsg.), The Social Production of Scientific Knowledge, Dordrecht, S. 171 – 215

Pinch, Trevor J., Wiebe E. Bijker (1987), *The Social Construction of Facts and Artifacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other*, in: Wiebe E. Bijker u.a. (Hrsg.), The Social Construction of Technological Systems. New Directions in the Sociology and History of Technology, Cambridge, Mass., S. 17 – 5

Piore, Michael J., Charles F. Sabel (1985), *Das Ende der Massenproduktion*, Berlin

Pohlmann, Friedrich (1987), *Individualität, Geld und Rationalität*. Georg Simmel zwischen Karl Marx und Max Weber, Stuttgart

Polanyi, Michael (1985), *Implizites Wissen*, Frankfurt/M.

Pollock, Friedrich (1956a), *Automation*, Frankfurt/M.

Pollock, Friedrich (1956b), *Die wirtschaftlichen und sozialen Folgen der Automatisierung*, in: Fritz Erler u.a. (Hrsg.), Revolution der Roboter, München, S. 106 – 140

Popper, Karl R. (1935), *Logik der Forschung*, Tübingen 1989

Post, Emil (1936), *Finite Combinatory Processes*. Formulation I, in: Martin Davis (Hrsg.), The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions, New York 1965, S. 289 – 291

Post, Emil (1965), *Absolutely Unsolvable Problems and Relatively Undecidable Propositions*. Account of an Anticipation: Appendix, in: Martin Davis (Hrsg.), The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions, New York, S. 418 – 433

Purkert, Walter (1990), *Cantor's View of the Foundations of Mathematics*, in: David E. Rowe und John McCleary (Hrsg.), The History of Modern Mathematics, Bd. 1, San Diego, S. 49 – 65

Purkert, Walter, Hans Joachim Ilgauds (1987), *Georg Cantor*, Basel

Putnam, Hilary (1975a), *Philosophy and our Mental Life*, in: ders., Mind, Language and Reality. Philosophical Papers, Vol. 2, Cambridge, S. 291 – 303

Putnam, Hilary (1975b), *Minds and Machines*, in: ders., Mind, Language and Reality. Philosophical Papers, Vol. 2, Cambridge, S. 362 – 381

Putnam, Hilary (1990), *Vernunft, Wahrheit und Geschichte*, Frankfurt/M.

Putnam, Hilary (1991), *Repräsentation und Realität*, Frankfurt/M.

Pylyshyn, Zenon W. (1980), *Computation and Cognition: Issues in the Foundation of Cognitive Science*, in: The Behavioral and Brain Sciences, 3, S. 111 – 132

Pylyshyn, Zenon W. (1986), *Computation and Cognition: Toward a Foundation of Cognitive Science*, Cambridge, Mass.

Pylyshyn, Zenon W. (1987), *Cognitive Science*, in: Encyclopedia of Artificial Intelligence, New York, Vol. I, S. 120 – 124

Pylyshyn, Zenon W. (1990), *Computing in Cognitive Science*, in: Michael Posner (Hrsg.), Foundations of Cognitive Science, Cambridge, Mass., S. 49 – 91

Quine, W.V.O. (1953), *Two Dogmas of Empiricism*, in: ders., From a Logical Point of View, Cambridge, Mass. 1980, S. 20 – 46

Rammert, Werner (1988), *Technisierung im Alltag*. Theoriestücke für eine spezielle soziologische Perspektive, in: Bernward Joerges (Hrsg.), Technik im Alltag, Frankfurt/M., S. 165 – 197

Rammert, Werner (1989a), *Technisierung und Medien in Sozialsystemen – Annäherungen an eine soziologische Theorie der Technik*, in: Peter Weingart (Hrsg.), Technik als sozialer Prozeß , Frankfurt/M., S. 128 – 173

Rammert, Werner (1989b), *Techniksoziologie*, in: Günter Endruweit und Gisela Trommsdorf (Hg.), Wörterbuch der Soziologie, Stuttgart, Bd. 3, S. 724 – 735

Rammert, Werner (1990), *Telephon und Kommunikationskultur*. Akzeptanz und Diffusion einer Technik im Vier-Länder-Vergleich, in: Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, 42, 1, S. 20 – 44

Rammert, Werner (1992), *From Mechanical Engineering to Information Engineering: Phenomenology and Social Roots of an Emerging Type of Technology*, in: Meinolf Dierkes und Ute Hoffmann (Hrsg.), Technology at the Outset, Frankfurt/M.

Rammstedt, Otthein (Hrsg.) (1988), *Simmel und die frühen Soziologen*. Nähe und Distanz zu Durkheim, Tönnies und Max Weber, Frankfurt/M., S. 222 – 276

Ramsey, Frank P. (1925), *Die Grundlagen der Mathematik*, in: ders., Grundlagen. Abhandlungen zur Philosophie, Logik, Mathematik und Wirtschaftwissenschaft, Stuttgart – Bad Cannstatt 1980, S. 131 – 177

Ramsey, Frank P. (1926), *Mathematische Logik*, in: ders., Grundlagen. Abhandlungen zur Philosophie, Logik, Mathematik und Wirtschaftswissenschaft, Stuttgart – Bad Cannstadt 1980, S. 178 – 192

Ramunni, Jérôme (1989), *La physique du calcul*. L'histoire de l'ordinateur, Paris

Randell, Brian (Hrsg.) (1982a), *The Origins of Digital Computers*, Berlin – Heidelberg – New York

Randell, Brian (1982b), *Colossus: Godfather of the Computer*, in: ders. (Hrsg.), The Origins of Digital Computers, Berlin – Heidelberg – New York, S. 349 – 354

Rang, B., W. Thomas (1981), *Zermelo's Discovery of the 'Russell Paradox'*, in: Historia Mathematica,, 8, S. 15 – 22

Reid, Constance (1989), *Hilbert. Courant*, Berlin – Heidelberg – New York

Rorty, Amelie O. (1962), *Slaves and Machines*, in: Analysis, 22, S. 118 – 120

Rosen, Robert (1988), *Effective Processes and Natural Law*, in: Rolf Herken (Hrsg.), The Universal Turing Machine. A Half Century Survey, Berlin, S. 523 – 538

Rumelhart, David E. (1990), *The Architecture of the Mind: A Connectionist Approach*, in: Michael Posner (Hrsg.), Foundations of Cognitive Science, Cambridge, Mass., S. 133 – 159

Russell, Bertrand (1901), *Mathematics and the Metaphysicians*, in: Mysticism and Logic, London 1951, S. 74 – 96

Russell, Bertrand (1972), *Autobiographie I. 1872 – 1914* (1967), Frankfurt/M.

Rust, Alois (1987), *Die organismische Kosmologie von Alfred N. Whitehead*, Frankfurt/M.

Salomaa, Arto (1985), *Computation and Automata*, Cambridge

Schluchter, Wolfgang (1979), *Die Entwicklung des okzidentalen Rationalismus*, Tübingen

Schopman, Joop (1987), *Frames of Artificial Intelligence*, in: Brian P. Bloomfield (Hrsg.), The Question of Artificial Intelligence: Philosophical and Sociological Perspectives, London, S. 165 – 219

Schütz, Alfred (1972), *Der Fremde*, in: ders., Gesammelte Aufsätze, Den Haag, Bd. 2, S. 53 – 69

Schütz, Alfred, Thomas Luckmann (1979), *Strukturen der Lebenwelt*, Frankfurt/M.

Schütz, Erhard (1977), *Kritik der literarischen Reportage*, München

Schütz, Erhard (1986), *Romane der Weimarer Republik*, München

Schütz, Erhard (1988), *Fließband – Schlachthof – Hollywood*. Literarische Phantasien über die Maschine USA, in: Erhard Schütz (Hrsg.), Willkommen und Abschied der Maschinen, Essen, S. 122 – 143

Schwartz, H.R. (1981), *The Early Years of Computing in Switzerland*, in: Annals of the History of Computing, 3, 2, S. 121 – 132

Schwartz, Ronald D. (1989), *Artificial Intelligence as a Sociological Phenomenon*, in: Canadian Journal of Sociology, 14, 2, S. 179 – 202

Searle, John R. (1981), *Minds, Brains, and Programs*, in: John Haugeland (Hrsg.), Mind Design. Philosophy, Psychology, Artificial Intelligence, Cambridge, Mass., S. 282 – 306, dt. in: Dieter Münch (Hrsg.), Kognitionswissenschaft, Frankfurt/M. 1992, S. 225 – 252

Searle, John R. (1986), *Geist, Hirn und Wissenschaft*, Frankfurt/M.

Searle, John R. (1987), *Intentionalität*, Frankfurt/M.
Shanker, S.G. (1987), *The Decline and Fall of the Mechanist Metaphor*, in: Rainer Born (Hrsg.), Artificial Intelligence. The Case Against, London, S. 72 – 131
Siegenthaler, Hansjörg (1983), *Konsens, Erwartungen und Entschlußkraft: Erfahrungen der Schweiz in der Überwindung der Großen Depression vor hundert Jahren*, in: Schweiz. Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik, 119, 3, S. 213 – 233
Siegenthaler, Hansjörg (1984), *Vertrauen, Erwartungen und Kapitalbildung im Rhythmus von Strukturperioden wirtschaftlicher Entwicklung*: Ein Beitrag zur theoriegeleiteten Konjunkturgeschichte, in: G. Bombach u.a. (Hrsg.), Perspektiven der Konjunkturforschung, Tübingen, S. 121 – 136
Siegenthaler, Hansjörg (1987), *Soziale Bewegungen und gesellschaftliches Lernen im Industriezeitalter*, in: Martin Dahinden (Hrsg.), Neue soziale Bewegungen – und ihre gesellschaftlichen Wirkungen, Zürich, S. 251 – 264
Siegenthaler, Hansjörg (1993), *Regelvertrauen, Prosperität und Krisen*. Unregelmäßigkeiten wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung als Ergebnis individuellen Handelns und Lernens, München
Simmel, Georg (1900), *Philosophie des Geldes*, Frankfurt/M. 1989
Simon, Herbert (1988), *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, Mass., dt.: Die Wissenschaften vom Künstlichen, Berlin 1990
Slezak, Peter (1989), *Scientific Discovery by Computer as Empirical Refutation of the Strong Programme*, in: Social Studies of Science, 19, S. 563 – 600
Smolensky, Paul (1988), *On the Proper Treatment of Connectionism*, in: The Behavioral and Brain Sciences, 11, S. 1 – 74
Spengler, Oswald (1923), *Der Untergang des Abendlandes*, München 1988
Star, Susan Leigh (1985), *Scientific Work and Uncertainty*, in: Social Studies of Science, 15, S. 391 – 427
Stark, Werner (1958), *The Sociology of Knowledge*, London 1977; dt.: Die Wissenssoziologie, Stuttgart 1960
Stegmüller, Wolfgang (1959), *Unvollständigkeit und Unentscheidbarkeit*. Die metamathematischen Resultate von Gödel, Church, Kleene und Rosser und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung, Wien
Stegmüller, Wolfgang (1987), *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie*, Bd.2, Stuttgart
Stegmüller, Wolfgang (1989), *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie*, Bd. 1, Stuttgart
Stehr, Nico, Volker Meja (1980), *Wissen und Gesellschaft*, in: dies. (Hrsg.), Wissenssoziologie, Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 22, Opladen 1980, S. 7 – 19
Stehr, Nico, Volker Meja (1982), *Zur gegenwärtigen Lage wissenssoziologischer Konzeptionen*, in: dies. (Hrsg.), Der Streit um die Wissenssoziologie, Frankfurt/M., Bd. 2, S. 893 – 946

Stein, Howard (1988), *Logos, Logic, and Logistiké: Some Philosophical Remarks on Nineteenth-Century Transformation of Mathematics*, in: William Aspray und Philip Kitcher (Hrsg.), History and Philosophy of Modern Mathematics, Minneapolis, S. 238 – 259

Stern, Nancy (1981), *From ENIAC to UNIVAC*, Bedford

Stichweh, Rudolf (1987), *Die Autopoiesis der Wissenschaft*, in: Dirk Baecker u.a. (Hrsg.), Theorie als Passion, Frankfurt/M., S. 447 – 481

Stichweh, Rudolf (1988), *Technologie, Naturwissenschaft und die Struktur wissenschaftlicher Gemeinschaften*, in: Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, 40, S. 684 – 705

Stigt, Walter P. van (1980), *The Rejected Parts of Brouwer's Dissertation on the Foundations of Mathematics*, in: Historia Mathematica, 6, S. 385 – 404

Stigt, Walter P. van (1990), *Brouwer's Intuitionism*, Studies in the History and Philosophy of Mathematics, Vol. 2, Amsterdam – New York

Suchman, Lucy A. (1987), *Plans and Situated Actions*. The Problem of Human–Machine Communication, Cambridge

Taylor, Frederick W. (1911), *Die Grundsätze wissenschaftlicher Betriebsführung*, München und Berlin 1919

Thiel, Christian (1972), *Grundlagenkrise und Grundlagenstreit*. Studie über das normative Fundament der Wissenschaften am Beispiel von Mathematik und Sozialwissenschaften, Meisenheim am Glan

Toepell, Michael-Markus (1986), *Über die Entstehung von Hilberts 'Grundlagen der Geometrie'*, Göttingen

Tönnies, Ferdinand (1887), *Gemeinschaft und Gesellschaft*, Darmstadt 1979

Turing, Alan M. (1936), *On Computable Numbers, With an Application to the Entscheidungsproblem*, repr.in: Martin Davis (Hrsg.), The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions, New York 1965, S. 116 – 151

Turing, Alan M. (1939) *Systems of Logic Based on Ordinals*, in: Martin Davis (Hrsg.), The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions, New York 1965, S. 155 – 222

Turing, Alan M. (1947), *The State of the Art*. Lecture to the London Mathematical Society, in: B.E. Carpenter und R.W. Doran (Hrsg.), A. M. Turings ACE Report of 1946 and other Papers, Cambridge, Mass. 1986, S. 106 – 124

Turing, Alan M. (1948), *Intelligent Machinery*, in: Bernhard Meltzer und Donald Michie (Hrsg.), Machine Intelligence, Vol. V., New York 1970, S. 3 – 23

Turing, Alan M. (1950), *Computing Machinery and Intelligence*, in: Alan Ross Anderson (Hrsg.), Minds and Machines, New York 1964, S. 4 – 30

Turing, Alan M. (1951), *Intelligente Maschinen*. Eine häretische Theorie, in: ders., Intelligence Service. Schriften, S. 9 – 15

Turing, Alan M. (1987), *Intelligence Service*. Schriften, hrsg. von Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler, Berlin

Turing, Sara (1959), *Alan M. Turing*, Cambridge

Tymoczko, Thomas (1979), *The Four-Color Problem and Its Philosophical Significance,* in: The Journal of Philosophy, 76, 2, S. 57 – 83

Urwick, Lyndall (1930), *Das Wesen der Rationalisierung*, Stuttgart

Urwick, Lyndall, E.F.L. Brech (1957), *The Making of Scientific Management*, Vol. I: Thirteen Pioniers, Vol. II: Management in British Industry, London

Varela, Francisco J. (1990), *Kognitionswissenschaft – Kognitionstechnik*, Frankfurt/M.

Volkert, Thomas (1986), *Die Krise der Anschauung*. Eine Studie zu formalen und heuristischen Verfahren in der Mathematik seit 1850, Göttingen

Waismann, Friedrich (Hrsg.) (1984), *Wittgenstein und der Wiener Kreis*, Frankfurt/M.

Walser, Robert (1907), *Geschwister Tanner*, Frankfurt/M. 1978

Walther, Alwin (1956), *Moderne Rechenanlagen als Muster und als Kernstück einer vollautomatisierten Fabrik*, in: Fritz Erler u.a. (Hrsg.), Revolution der Roboter, München, S. 7 – 64

Wandschneider, Dieter (1990), *Die Gödeltheoreme und das Problem Künstlicher Intelligenz*, in: Ethik und Sozialwissenschaften, 1, 1, S. 107 - 115 bzw. S. 116 – 159 (inkl. Repliken)

Wang, Hao (1974), *From Mathematics to Philosophy*, New York

Webb, Judson C. (1980), *Mechanism, Mentalism, and Metamathematics*, Dordrecht

Webb, Judson, C. (1983), *Gödel's Theorem and Church's Thesis*. A Prologue to Mechanism, in: R.S. Cohen und M.W. Wartofsky (Hrsg.), Language, Logic, and Method, Dordrecht, S. 309 – 353

Weber, Max (1907), *R. Stammlers 'Überwindung' der materialistischen Geschichtsauffassung*, in: ders., Gesammelte Aufsätze zur Wissenschaftslehre, Tübingen 1988, S. 291 – 359

Weber, Max (1913), *Über einige Kategorien der verstehenden Soziologie*, in: ders., Gesammelte Aufsätze zur Wissenschaftslehre, Tübingen 1988, S. 427 – 474

Weber, Max (1918), *Der Sinn der 'Wertfreiheit' der soziologischen und ökonomischen Wissenschaften*, in: ders., Gesammelte Aufsätze zur Wissenschaftslehre, Tübingen 1988, S. 489 – 540

Weber, Max (1921), *Wirtschaft und Gesellschaft*, Tübingen 1976

Weber, Max (1922), *Die drei reinen Typen der legitimen Herrschaft*, in: ders., Gesammelte Aufsätze zur Wissenschaftslehre, Tübingen 1988, S. 475 – 488

Weber, Max (1965), *Die protestantische Ethik*, München und Hamburg

Weingart, Peter (1982), *Strukturen technologischen Wandels*. Zu einer soziologischen Analyse der Technik, in: Rodrigo Jokisch (Hrsg.), Techniksoziologie, Frankfurt/M., S. 112 – 141
Weingart, Peter (1989) (Hrsg.), *Technik als sozialer Prozeß*, Frankfurt/M.
Weiss, Paul (1961), *Love in a Machine Age*, in: Sidney Hook (Hrsg.), Dimensions of Mind, New York, S. 193 – 197
Weizenbaum, Joseph (1966) *ELIZA – A Computer Program for the Study of Natural Language Communication Between Man and Machine*, repr. in: Communications of the ACM, 1983, 26, 1, S. 23 – 28
Weizenbaum, Joseph (1974), *Automating Psychotherapy*, repr. in: Communications of the ACM, 1983, 26, 1, S. 28
Weizenbaum, Joseph (1978), *Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft*, Frankfurt/M.
Werlen, Benno, *Gesellschaft, Handlung, Raum*, Stuttgart 1987
West, Candace, Don H. Zimmermann (1991), *Doing Gender*, in: Judith Lorber und Susan A. Farrell (Hrsg.), The Social Construction of Gender, Newbury Park, S. 13 – 37
Weyl, Hermann (1921), *Über die neue Grundlagenkrise der Mathematik*, in: Gesammelte Abhandlungen, hrsg. von K. Chandrasekharan, Berlin – Heidelberg – New York 1968, Bd. 2, S. 143 – 178
Weyl, Hermann (1924), *Randbemerkungen zu Hauptproblemen der Mathematik*, in: Gesammelte Abhandlungen, hrsg. von K. Chandrasekharan, Berlin – Heidelberg – New York 1968, Bd. 2, S. 433 – 452
Weyl, Hermann (1925), *Die heutige Erkenntnislage in der Mathematik*, in: Gesammelte Abhandlungen, hrsg. von K. Chandrasekharan, Berlin – Heidelberg – New York 1968, Bd. 2, S. 511 – 542
Weyl, Hermann (1926), *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft*, München und Berlin
Weyl, Hermann (1928), *Diskussionsbemerkungen zu dem zweiten Hilbertschen Vortrag über die Grundlagen der Mathematik*, in: Gesammelte Abhandlungen, hrsg. von K. Chandrasekharan, Berlin – Heidelberg – New York 1968, Bd. 3, S. 147 – 149
Weyl, Hermann (1944), *David Hilbert and His Mathematical Work*, in: Constance Reid, Hilbert, Berlin – Heidelberg – New York 1970, S. 245 – 283
Weyl, Hermann (1955), *Nachtrag zu: Über die neue Grundlagenkrise der Mathematik*, in: Gesammelte Abhandlungen, hrsg. von K. Chandrasekharan, Berlin – Heidelberg – New York 1968, Bd. 2, S. 179 – 180
Weyl, Hermann (1971), *Über den Symbolismus der Mathematik und mathematischen Physik*, in: K. Reidemeister (Hrsg.), Hilbert, Berlin – Heidelberg – New York, S. 20 – 38
Whitehead, Alfred N. (1920), *The Concept of Nature*, Cambridge 1964; dt.: Der Begriff der Natur, Stuttgart 1990

Whitehead, Alfred N. (1925), *Science and the Modern World*, New York 1939; dt.: Wissenschaft und moderne Welt, Frankfurt/M. 1988

Wilkes, Maurice (1985), *Memoirs of a Computer Pioneer*, Cambridge, Mass.

Williams, Michael Roy (1985), *A History of Computing Technology*, Englewood Cliffs, N.J.

Winograd, Terry, Fernando Flores (1986), *Understandig Computers and Cognition*, Reading, Mass.; dt.: Erkenntnis. Maschinen. Verstehen, Berlin 1989

Wittgenstein, Ludwig (1953), *Philosophische Untersuchungen*, Werkausgabe Bd. 1, Frankfurt/M. 1984

Wittgenstein, Ludwig (1956), *Bemerkungen über die Grundlagen der Mathematik*, Werkausgabe Bd. 6, Frankfurt/M. 1984

Wittgenstein, Ludwig (1969), *Über Gewißheit*, Frankfurt/M. 1971

Wolfe, Alan (1991), *Mind, Self, Society, and Computer: Artificial Intelligence and the Sociology of Mind*, in: American Journal of Sociology, 96, 5, S. 1073 – 1096

Woolgar, Steve (1985), *Why Not a Sociology of Machines?* The Case of Sociology and AI, in: Sociology, 19,4, S. 557 – 572

Woolgar, Steve (1987), *Reconstructing Man and Machine: A Note on Sociological Critiques of Cognitivism*, in: Wiebe E. Bijker u.a. (Hrsg.), The Social Construction of Technological Systems. New Directions in the Sociology and History of Technology, Cambridge, Mass., S. 311 – 328

Woolgar, Steve (Hrsg.) (1988), *Knowledge and Reflexivity*. New Frontiers in the Sociology of Knowledge, London

Wren, Daniel (1987), *The Evolution of Management Thought*, New York

Wright, Susan (1986), *Molecular Biology or Molecular Politics: The Production of Scientific Consensus on the Hazards of Recombinant DNA Technology*, in: Social Studies of Science, 16, S. 593 – 620

Wynne, Brian (1976), *C.G. Barkla and the J-Phenomenon: A Case Study of the Treatment of Deviance in Physics*, in. Social Studies of Science, 6, S. 307 – 347

Wynne, Brian (1979), *Between Orthodoxy and Oblivion: The Normalisation of Deviance in Science*, in: Roy Wallis (Hrsg.), On the Margins of Science: The Social Construction of Rejected Knowledge, Keele, S. 67 – 84

Wynne, Brian (1988), *Unruly Technology: Practical Rules, Impractical Discourses and Public Understanding*, in: Social Studies of Science, 18, S. 147 – 167

Yearley, Steven (1982), *The Relationship Between Epistemological and Sociological Cognitive Interest*. Some Ambiguities Underlying the Use of Interest Theory in the Study of Scientific Knowledge, in: Studies in History and Philosophy of Sciences, 13, 4, S. 353 – 388

Zuse, Konrad (1970), *Der Computer. Mein Lebenswerk*, München

Zuse, Konrad (1984), *Der Computer – Mein Lebenswerk*, Berlin

# Personenregister

Aiken, Howard, 212; 215; 229; 231
Babbage, Charles, 215, 216
Bachmann, Heinz, 54
Baldus, Richard, 25; 189
Barnes, Barry, 133; 141
Behmann, Heinrich, 71
Bernays, Paul, 17; 18; 24; 26; 30; 46; 56; 67; 70; 149; 184
Bigelow, Julian, 220
Bittorf, Wilhelm, 232
Bloor, David, 129f.; 132; 133f.; 140
Blumenthal, Otto, 22; 23; 51; 184; 199
Bohm, David, 150
Bolter, David J., 206
Bourbaki, N., 29; 156
Brouwer, Luitzen, Egbertus, Jan, 21; 34ff.; 44; 46; 47; 58; 61; 142; 176; 183; 185ff.; 197ff.
Burali-Forti, Cesare, 177f.; 180; 182
Burks, Arthur W., 220
Bush, Vannevar, 217
Cantor, Georg, 21; 30ff.; 61; 86; 177; 179f.; 182
Carathéodory, Constantin, 199
Carnap, Rudolf, 65
Cassirer, Ernst, 114
Cauchy, Augustin Louis, 142
Church, Alonzo, 63; 75; 76f.; 88; 89; 166
Colby, Kenneth M., 277f.
Collins, H.M., 131; 135; 222ff.; 240; 293ff.; 299
Couffignal, Louis, 213; 222
Curry, Haskell B., 183
Dedekind, Richard, 18; 20; 55; 179; 181
Dennett, Daniel C., 291
Dreyfus, Hubert, L., 279; 283ff.; 296
Duhem, Pierre, 123; 124
Durkheim, Emile, 237; 238f.; 240
Eckert, Presper J., 212; 221
Einstein, Albert, 56; 199
Enzensberger, Hans Magnus, 70
Feyerabend, Paul, 109; 122; 124; 129
Finsler, Paul, 64; 149f.
Fleck, Ludwik, 126ff.; 137; 156; 175
Fodor, Jerry, 97; 275
Ford, Henry, 168; 170ff.
Forman, Paul, 188f.; 197; 198
Fraenkel, Abraham, 35; 182, 200
Frege, Gottlob, 19; 23; 27f.; 30; 33; 55; 58; 61; 178; 180; 181
Freudenthal, Hans, 60
Gandy, Robin, 90
Garciadiego, Alejandro R., 178
Garfinkel, Harold, 284, 290; 291f.
Gentzen, Gerhard, 67; 68
Gilbert, Nigel G., 136
Gödel, Kurt, 45; 47; 63; 64ff.; 76; 85; 91; 100f.; 149f.; 177; 200
Goffman, Erving, 288
Goldstine, Hermann, 220
Gottl-Ottlilienfeld, Friedrich von, 171
Grelling, Kurt, 33
Habermas, Jürgen, 21; 150f.
Hahn, Hans, 201
Hanson, Norwood R., 109; 122
Hardy, Godfrey H., 71; 140

Hartree, Douglas R., 229
Herbrand, Jacques, 76
Hermes, Hans, 72; 73
Hesse, Mary, 134
Heyting, Arend, 37; 200
Hilbert, David, 9; 18ff.; 36; 37; 44ff.; 67; 70; 85; 88; 91; 101f.; 142; 146; 149; 154; 156; 164f.; 175; 176f.; 179ff.; 198ff.; 282
Hilton, Peter, 69
Hobbes, Thomas, 96; 97
Hochhuth, Rolf, 70
Hodges, Andrew, 71; 98; 264
Hofstadter, Douglas R., 51f.
Holton, Gerald, 137f.
Hörning, Karl H., 238; 239; 243; 246
Hughes, Thomas, 216
Husserl, Edmund, 38; 40f.; 41; 121; 126; 137; 193
Huxley, Aldous, 173
Jahnke, Hans Niels, 20
Joerges, Bernward, 237ff.; 243; 245; 297
Kisch, Egon Erwin, 171
Kleene, Stephen C., 72; 73f.; 76
Knorr-Cetina, Karin, 119; 131; 132; 136; 138ff.; 166; 247
Knuth, Donald E., 73
Korteweg, D.J., 35; 38; 186
Krämer, Sybille, 17; 55; 60; 106
Kuhn, Thomas S., 109; 122; 123f.; 128; 133; 191; 214
Lakatos, Imre, 122; 124f.; 129; 142ff.; 150; 152; 183
La Mettrie, Julien Offray de, 96
Laudan, Larry, 130; 132; 141
Leibniz, Gottfried Wilhelm, 86
Linde, Hans, 238
Locher, L., 64
Lucas, John, 279; 282f.
Luhmann, Niklas, 28; 236; 263; 288
Lukács, Georg, 114
MacKenzie, Donald, 133
Manin, Yu I., 147
Mannheim, Karl, 109; 112; 114ff.; 129; 130; 133; 150; 155; 193f.; 290
Mauchly, John W., 212; 221
McCulloch, Warren, 205f.; 219
Mehrtens, Herbert, 16; 21; 45; 178; 189f.
Merton, Robert K., 151
Minsky, Marvin, 84; 287f.
Moore, Gregory J., 178
Mulkay, Michael, 128; 131; 132; 135; 136; 140f.
Nagel, Ernest, 50; 282f.
Neumann, John von, 71; 149; 150; 182; 200; 205; 213; 219ff.; 226ff.
Newell, Allen, 158; 267f.; 275; 287
Newman, James R., 50; 282f.
Newman, M.H.A., 70; 71; 89
Peano, Giuseppe, 20; 33; 55; 178
Peckhaus, Volker, 44; 184f.
Pinch, Trevor J., 150; 225f.; 228
Pitts, Walter, 205f.; 219
Poincaré, Henri, 29; 46; 61; 156
Polanyi, Michael, 269
Polgar, Alfred, 161
Pollock, Friedrich, 232; 233
Popper, Karl, 122; 123; 125f.; 130; 142; 145; 147
Post, Emil, 77; 103f.; 166ff.; 174; 234; 254; 296
Putnam, Hilary, 97; 105; 256f.; 283
Pylyshyn, Zenon W., 97; 274f.
Quine, W.V.O., 122; 123f.; 247
Rammert, Werner, 249ff.
Reichenbach, Hans, 65
Reid, Constance, 67
Riemann, Bernhard, 20
Russell, Bertrand, 33; 44; 142; 178; 179ff.; 185

Rutishauser, Heinz, 222
Schank, Robert, 287f.
Schütz, Alfred, 193; 244f.; 248
Searle, John R., 105; 270; 279ff.
Shapin, Steven, 133
Siegenthaler, Hansjörg, 177; 190ff.
Simmel, Georg, 15; 114; 155; 157; 158f.
Simon, Herbert A., 58; 206; 267f.; 275; 287
Skolem, Thoralf, 66; 200
Slezak, Peter, 130
Speiser, Ambros P, 222
Spengler, Oswald, 188; 195ff.
Stark, Werner, 119
Stibitz, George, 212; 215; 232
Stichweh, Rudolf, 28; 139
Suchman, Lucy A., 279; 286ff.
Taylor, Frederick W., 162; 164; 168; 169ff.; 251; 294f.; 297
Thiel, Christian, 189
Tönnies, Ferdinand, 15; 157; 158; 195
Toulmin, Stephen, 122
Turing, Alan M., 9f.; 15; 31; 51; 54; 55; 63ff.; 69; 70; 71; 77; 79ff.; 141; 155; 166ff.; 172f.; 200; 205; 209ff.; 217; 219; 226f.; 231; 234f.; 251; 254f.; 257f.; 262; 263ff.; 270ff.; 284; 292; 296; 299
Turing, Sara, 70
Urwick, Lyndall, 173
Volkert, Thomas, 20; 59
Webb, Judson C., 88; 93
Weber, Max, 15; 155; 157ff.; 165; 169; 238; 244; 252ff.; 293; 299
Weierstraß, Karl, 20
Weizenbaum, Joseph, 276f.; 289ff.
Weyl, Hermann, 30; 34; 44; 48; 49; 57; 175f.; 187f.; 198; 200
Whitehead, Alfred N., 39; 40
Whitemore, Hugh, 70
Wilkes, Maurice, 220; 222; 226
Wittgenstein, Ludwig, 50; 111; 141; 284
Woolgar, Steve, 297f.
Wynne, Brian, 225; 247
Zermelo, Ernst, 44; 149; 180; 182; 200
Zuse, Konrad, 168; 211f.; 214f.; 216; 222; 226f.; 231